

**Construcción y puesta en marcha de un reactor tipo Batch a escala piloto para el
tratamiento terciario de aguas residuales municipales de la ciudad de Barranquilla**

Cristian Andrés Bolívar Hernández

Natalia Carolina Contreras Guzmán



Corporación Universidad de la Costa - CUC

Departamento de Civil y Ambiental

Programa de Ingeniería Ambiental

Barranquilla, Atlántico

2019

Construcción y puesta en marcha de un reactor tipo Batch a escala piloto para el tratamiento terciario de aguas residuales municipales de la ciudad de Barranquilla

Cristian Andrés Bolívar Hernández

Natalia Carolina Contreras Guzmán

Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de:

Ingeniero Ambiental

Director:

Rubén Darío Cantero Rodelo

Magister en Ciencias Ambientales

Codirector:

Andrea Carolina Yanes Guerra

Magister en Manejo Integrado Costero

Corporación Universidad de la Costa - CUC

Departamento de Civil y Ambiental

Programa de Ingeniería Ambiental

Barranquilla, Atlántico

2019

Nota de aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Barranquilla, 14 de Junio de 2019.

Agradecimientos

A mi familia, especialmente a mis padres Josefina Guzmán y Orlando Contreras, quienes han sido mi bastión y fortaleza para poder llegar a culminar mi carrera. A ellos gracias por todo el sacrificio, apoyo, dedicación, ejemplo y enseñanzas. Les debo todo lo que soy, por eso todo lo que he conseguido también es de ustedes.

A mis abuelas Damaris e Isabel, por brindarme todo el amor y las enseñanzas que me han dado para hoy ser lo que soy.

A mi Alma Máter, Universidad de la Costa, por abrirme las puertas para formarme profesionalmente y permitirme explotar mis cualidades.

A nuestro tutor de tesis Rubén Cantero Rodelo y cotutora Andrea Yanes Guerra por su acompañamiento, apoyo y confianza. Gracias por el tiempo y esfuerzo que ofrecieron para compartir sus conocimientos.

A la EDAR El Pueblo por brindarnos la información y las muestras de agua requeridas para la elaboración de nuestro trabajo de grado.

A mi compañero incondicional Cristian Bolívar, por su amistad, cariño y apoyo durante este proceso.

Natalia Contreras Guzmán.

En primer lugar, quiero agradecer a Dios, quien me ha regalado el don de la vida, que diariamente me transmite su paz, su amor y su fidelidad. Él es la razón de mí ser y por quien he conseguido todo lo que soy, a Él le pertenece mi vida.

A mi madre Lida Hernández, quien me ha levantado con esfuerzo, dedicación y amor; formando y haciendo de mí un hombre con valores. A mi padre que está en el cielo, quien siempre me ha acompañado y quien recuerdo todos los días de mi vida, a él gracias por su legado. A mis hermanos Lily y José, por ser esos compañeros de vida, con quien he crecido y he pasado momentos buenos y malos. A mi familia en general, abuelos, tíos y primos, quienes siempre han sido una voz de aliento y un ejemplo por seguir, gracias por su amor y cariño.

A mi alma mater, la Universidad de la Costa, por brindarme el conocimiento necesario para crecer y formarme como profesional, sin lugar a dudas el apoyo y las enseñanzas de cada uno de los docentes que se cruzaron en este camino, fueron fundamentales para hoy conseguir este logro.

Agradecer de manera especial y sincera a nuestro tutor MSc. Rubén Cantero y cotutora MSc. Andrea Yáñez, por su apoyo y confianza en nuestro trabajo, su capacidad para guiarnos y estar siempre dispuestos a transmitir sus conocimientos. Gracias a ambos.

Finalmente, a mi incondicional compañera de tesis y carrera, Natalia Contreras, por estar siempre dispuesta a trabajar en equipo, con su ayuda hoy esto es posible. A ti mil gracias y éxitos en tu vida.

Cristian Bolívar Hernández.

Resumen

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales contribuyen a que las altas concentraciones de nutrientes no afecten la calidad de los cuerpos de agua receptores, ni limiten las actividades económicas que se deriven de estos. Por lo anterior, en el presente trabajo de investigación se construyó un reactor tipo Batch para el tratamiento terciario de aguas residuales municipales, el cual contaba con dos biorreactores de lecho fijo, un tanque de abastecimiento y dos bombas para la circulación del agua y suministro de aire. Para la puesta en marcha del sistema se tuvieron en cuenta dos escenarios, el sistema de tratamiento simple (con circulación y aireación) y el sistema con filtración múltiple incluyendo microalgas y material bioadsorbente, en ambos casos se evaluaron los parámetros de demanda biológica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), fosfatos, nitratos, nitritos y parámetros de control (alcalinidad, pH, oxígeno disuelto, entre otros); se tomaron alícuotas cada 2 y 4 horas en los dos montajes. Posteriormente, mediante el análisis de varianza se evaluó el sistema a partir de los porcentajes de remoción; en el sistema de tratamiento simple (STS) se evidencio una mayor remoción en el parámetro de DQO con un 83,7% y menor en la alcalinidad con un 1,04%. Sin embargo, el sistema de filtración múltiple (SFM) ofreció mayor remoción, principalmente en los nutrientes, obteniendo un porcentaje del 100% para los nitritos y mostrando una menor eficiencia en la reducción de alcalinidad debido a las características del material bioadsorbente, con presencia de CaCO_3 .

Palabras clave: análisis de varianza, contaminantes del agua residual, reactor tipo Batch, tratamiento terciario de aguas residuales

Abstract

The wastewater treatment systems contribute to the high concentrations of nutrients that do not affect the quality of the water bodies receivers, nor limit the economic activities that derive from them. Therefore, in the present research work a Batch reactor was built for the tertiary treatment of municipal wastewater, which had two fixed-bed bioreactors, a supply tank and two pumps for water circulation and air supply. For the startup of the system, two scenarios were taken into account, the simple treatment system (with circulation and aeration) and the system with multiple filtration including microalgae and bioadsorbent material, in both cases the parameters of the biological oxygen demand (DBO), chemical oxygen demand (DQO), phosphates, nitrates, nitrites and control parameters (alkalinity, pH, dissolved oxygen, among others) were evaluated; aliquots were taken every 2 and 4 hours in the two assemblies. Subsequently, through the analysis of variance, the system was evaluated based on the percentages of removal; in the simple treatment system (STS), greater removal was observed in the DQO parameter with 83,7% and lower in the alkalinity with 1,04%. However, the multiple filtration system (SFM) offered greater removal, mainly in the nutrients, obtaining a percentage of 100% for the nitrites and showing a lower efficiency in the reduction of alkalinity due to the characteristics of the bioadsorbent material, with the presence of CaCO_3 .

Key words: analysis of variance, wastewater pollutants, Batch reactor, tertiary wastewater treatment

Contenido

Lista de tablas y figuras	11
Introducción	13
1. Planteamiento del problema	16
1.1 Descripción del problema	16
1.2 Pregunta problema	17
2. Justificación.....	18
3. Objetivos	20
3.1 General	20
3.2 Específicos.....	20
4. Marco referencial.....	20
4.1 Estado del arte.....	20
5. Marco conceptual	24
5.1 Agua residual.....	24
5.1.1 Aguas residuales domesticas (ARD).	24
5.2 Características de las aguas residuales	25
5.2.1 Características físicas.	25
5.2.1.1 Temperatura.	25
5.2.1.2 Turbidez.	26
5.2.1.3 Color.	26
5.2.1.4 Olor.....	26
5.2.1.5 Sólidos totales.	27
5.2.1.6 Sólidos suspendidos.....	27
5.2.1.7 Solidos filtrables.....	27
5.2.1.8 Conductividad.	28

5.2.2	Características químicas.	28
5.2.2.1	Materia orgánica.	29
5.2.2.2	Materia inorgánica.	31
5.2.3	Características biológicas.	36
5.2.4	Tratamiento de las aguas residuales	37
5.2.4.1	Tratamiento Terciario.	38
5.2.4.2	Tratamientos aeróbicos y anaeróbicos.	41
5.2.4.3	Tratamientos anaeróbicos	42
6.	Marco legal.	49
6.1	Internacional	49
6.1.1	Ley General sobre Medio Ambiente y Recursos Naturales.	49
6.2	Nacional.	49
6.2.1	Resolución No. 1076 de 2015.	49
6.2.2	Resolución No. 631 de 2015.	49
6.2.3	Resolución No. 1207 del 2014.	50
6.2.4	Resolución No. 1514 de 2012.	50
6.2.5	Decreto No. 1541 de 1978.	50
7.	Diseño metodológico	51
7.1	Tipo de investigación y alcance	52
7.2	Área de estudio y toma de muestra	52
7.3	Formulación de Hipótesis	53
7.4	Fases de la investigación	54
7.4.1	Fase 1: Construcción del sistema.	54
7.4.2	Fase 2: Prueba del reactor a escala piloto.	57
	Con el fin de evaluar el funcionamiento del sistema construido, se realizó el montaje del agua residual en dos condiciones,	57

7.4.2.1	Sistema de tratamiento simple (STS).....	58
7.4.2.2	Sistema de filtración múltiple (SFM).	59
7.4.3	Fase 3: Análisis estadístico de remoción de parámetros.....	59
8.	Resultados y análisis	62
8.1	Construcción del Sistema de Tratamiento	62
8.1.1	Sistema de tratamiento simple (STS).	63
8.1.2	Sistema de filtración múltiple.	63
8.2	Pruebas del reactor tipo Batch a escala piloto	66
8.2.1	Tiempo de retención, caudal y volumen.	67
8.2.1.1	Tiempo de retención.	67
8.2.2	Sistema de tratamiento simple (STS).	69
8.2.3	Sistema de filtración múltiple (SFM).	69
8.3	Análisis estadístico de remoción de parámetros	70
8.3.1	Porcentaje de remoción.....	70
9.	Conclusiones	85
10.	Recomendaciones	88
11.	Referencias	89
Anexos	100

Lista de tablas y figuras

Tablas

Tabla 1 Relación entre algunos constituyentes inorgánicos y el agua residual	35
Tabla 2 Constituyentes del agua residual doméstica	36
Tabla 3 Parámetros con su respectivo código de análisis	58
Tabla 4. Materiales utilizados durante la construcción del reactor tipo Batch	62
Tabla 5 Resumen del procesamiento de datos para el análisis estadístico	73
Tabla 6 Resumen de prueba de normalidad. Corrección de significación de liliefors	74
Tabla 7 Prueba de racha	75
Tabla 8 Prueba de homogeneidad de varianza	76
Tabla 9 Análisis de varianza ANOVA	77
Tabla 10 Medias de datos homogéneos en la entrada del sistema	78
Tabla 11 Medias de datos homogéneos en la salida del sistema	78
Tabla 12 Resumen de procesamiento de datos	79
Tabla 13 Resumen de prueba de normalidad	80
Tabla 14 Pruebas de rachas	81
Tabla 15 Prueba de homogeneidad de varianzas	82
Tabla 16 Análisis de varianza ANOVA	82
Tabla 17 Medias de datos homogéneos en la entrada del sistema	83
Tabla 18 Medias de datos homogéneos en la salida del sistema	84
Tabla 19. Datos de las concentraciones obtenidas durante las pruebas realizadas en la evaluación preliminar del sistema	100
Tabla 20 Datos de las concentraciones obtenidas durante las pruebas realizadas en la evaluación del sistema de tratamiento simple (STS)	101
Tabla 21 Datos de las concentraciones obtenidas durante las pruebas realizadas en la evaluación del sistema de tratamiento con filtración múltiple (SFM)	101
Tabla 22. Tabla de comparaciones múltiples sobre el análisis de varianza del sistema de tratamiento simple (STS)	102
Tabla 23 Tabla de comparaciones múltiples sobre el análisis de varianza del sistema de tratamiento con filtración múltiple (SFM)	107

Figuras

Figura 1. Clasificación de las partículas sólidas contenidas en un agua residual según su diámetro.

Fuente: UDEP, 2016..... 28

Figura 2. Determinación de la DBO5. Determinación manométrica de la disminución de presión por el consumo del oxígeno por parte del agua. Fuente: Alcaraz, 2017..... 30

Figura 3. Zanjón de oxidación. Fuente: Empresa De Servicios Públicos De El Rosal, 2016. 40

Figura 4. Proceso de lodos activados..... 42

Figura 5 Tanques de digestión anaeróbica 44

Figura 6 Sistemas anaeróbicos: primera generación 44

Figura 7 Sistemas anaeróbicos: segunda generación..... 45

Figura 8 Sistemas anaeróbicos: tercera generación. 45

Figura 9. Efectos de la eutrofización sobre la vida béntica marina 46

Figura 10. Diseño metodológico. Fuente: Autores..... 51

Figura 11. Estación depuradora de Aguas Residuales. Fuente: Google Earth. (2015). 53

Figura 12. Diseño y dimensiones del reactor tipo Batch. Fuente: Autores. 63

Figura 13. Diseño de los reactores con el material bioadsorbente incorporado. Fuente: Autores..... 64

Figura 14. Resultado final del sistema de tratamiento. Fuente: Autores. 64

Figura 15. Sistema de tratamiento construido, reactor tipo Batch. Fuente: Autores. 65

Figura 16. Resultado final del reactor construido y en funcionamiento con el agua residual municipal.

Fuente: Autores. 66

Figura 17. Determinación del tiempo de retención mediante el monitoreo de Nitratos (a), nitritos (b), fosfatos (c), DBO5 (d), DQO (e). Fuente: Autores. 68

Figura 18. Porcentajes de remoción de los parámetros evaluados en el sistema de tratamiento simple (STS). Fuente: Autores. 71

Figura 19. Porcentajes de remoción de los parámetros evaluados en el sistema de filtración múltiple (SFM). Fuente: Autores. 72

Introducción

Las aguas residuales corresponden a aquellas que provienen de usos domésticos, comerciales e industriales, y que son recolectadas por medio de sistemas de alcantarillado, a su vez estas transportan una serie de contaminantes como materia orgánica, sólidos disueltos, nutrientes, entre otros (Cedrón y Cribilleros, 2017). La presencia de compuestos en el agua residual, con diferentes concentraciones, microorganismos y sólidos suspendidos, ocasionan una serie de efectos adversos sobre la calidad de los cuerpos de agua superficiales en los que son depositados, principalmente por la falta de un tratamiento previo o la deficiencia en el mismo (Torres, 2014).

Las características de las aguas residuales han incidido de forma significativa sobre las masas de agua en las que son vertidas, tales como ríos, lagos, mares, acuíferos y otros, hasta el punto de limitar los sistemas de autodepuración que tienen dichos ecosistemas para descomponer los contaminantes y asimilarlos, perdiendo de esta forma su calidad fisicoquímica y la biodiversidad acuática que permite mantener el equilibrio necesario para preservar estos cuerpos (Briceño y Torres, 2016). Dicha situación ha dado origen al desarrollo de una serie de estudios sobre el control y la prevención de la contaminación producto de las aguas residuales que se derivan de los usos municipales, tendientes a solucionar la problemática presentada en los cuerpos de agua receptores (CNDH y UNAM, 2018).

Algunos de los contaminantes de mayor concentración en las aguas residuales municipales, corresponden a los nutrientes, los cuales provocan la eutrofización de los cuerpos de agua naturales ante el exceso, afectando la vida acuática por la disminución del oxígeno disuelto y la poca entrada de luz, repercutiendo de la misma manera en la pérdida de la calidad del agua para los diferentes usos establecidos (Almeida, Betanzos, García, I., García, N., Montalvo, 2014). Así mismo, los sistemas de tratamiento convencionales son eficientes para la eliminación de los

compuestos que se consideran de mayor relevancia en los efluentes generados, sin embargo, la capacidad de remoción de los nutrientes es insuficiente, llegando incluso a incumplir con los valores permisibles exigidos por la ley (CNDH y UNAM, 2018).

Entre los sistemas que han sido estudiados por el uso simultaneo de procesos físicos, químicos y biológicos para el tratamiento terciario de las aguas residuales, se encuentran los reactores tipo Batch de flujo vertical, los cuales ha sido aplicados por ser una opción eficaz y económica para la eliminación de los nutrientes en los efluentes de los sistemas convencionales (Carrasquero, Díaz, Pire y Rincón, 2014).

Teniendo en consideración la importancia de disponer con agua de calidad para garantizar la protección de la salud humana, el medio ambiente y el desarrollo económico, en diferentes países se ha ampliado la investigación sobre los sistemas de tratamiento terciarios, con el fin de mantener las condiciones óptimas del agua tratada (Ramon - Pedret, Santín y Vilanova, 2017). Especialmente se ha hecho énfasis en el control y la operación de dichos sistemas terciarios, ante el aumento en las exigencias que regulan la calidad del agua en los efluentes, haciendo necesaria la implementación de nuevas alternativas de tratamiento o tecnologías que permitan remover lo que, con tratamientos preliminares, primarios o secundarios no se logra eliminar (Pedret et al., 2017).

Por lo anteriormente expuesto, en el presente proyecto se contempla la construcción de un sistema de tratamiento terciario como una posibilidad de solucionar los problemas derivados de la disposición inadecuada de las aguas residuales municipales, buscando satisfacer las necesidades que se evidencian en la baja calidad de las aguas residuales tratadas y que afectan los diversos cuerpos de agua receptores. En el proyecto se construyó un reactor tipo Batch con flujo vertical para evaluar su eficiencia en la remoción de contaminantes como el exceso de

nutrientes, alcalinidad, demanda biológica y química de oxígeno presentes en aguas residuales municipales previamente tratadas en la EDAR El Pueblo, monitoreando de igual forma los parámetros de pH y temperatura, ajustando las condiciones de operación para identificar el mejor periodo de retención hidráulico que maximice el tratamiento y las características del efluente.

El siguiente trabajo de grado se realizó por medio del diseño propuesto en el proyecto de investigación denominado “*Desarrollo de un sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas mediante la implementación de filtración múltiple con material bioadsorbente y microalgas*”, liderado por docentes de la Universidad de la Costa, con número de publicación internacional WO 2019/029755 A1. De la investigación se desglosan otros tres trabajos de grado titulados “*Evaluación de materiales bioadsorbentes modificados térmicamente en la remoción de nutrientes presentes en aguas residuales municipales de la ciudad de Barranquilla*”, “*Eliminación de fosfatos y nitratos de aguas residuales municipales utilizando Chlorella Sp. en un sistema de reactores en continuo*” y “*Evaluación de la eficiencia de remoción de nutrientes presentes en aguas residuales municipales en un sistema de tratamiento terciario con filtración múltiple*”.

1. Planteamiento del problema

1.1 Descripción del problema

Actualmente, se han efectuado diferentes políticas que regulan las concentraciones de los contaminantes presentes en las aguas residuales municipales, sin embargo, los vertimientos inadecuados de estas a lagos, ríos o embalses corresponden a una de las problemáticas más críticas a nivel mundial; la principal afectación se debe a la presencia de nutrientes, debido a su incidencia en la proliferación de plantas en la superficie de los cuerpos de agua y de otros organismos que disminuyan la calidad de los mismos (Gómez y Henao, 2018). Nutrientes como el nitrógeno y el fósforo, que se generan en diferentes actividades humanas, ocasionan el crecimiento de algas en las aguas superficiales, modificando sus características fisicoquímicas al reducir el oxígeno disuelto necesario para la diversidad biológica, alterando los procesos biológicos normales y la emisión de olores ofensivos, incidiendo de igual manera en los problemas sanitarios que afectan a los habitantes de las zonas aledañas (Ramos, 2018).

Según lo dispuesto en el Informe Mundial sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas, en su edición 2017, más del 80% de las aguas residuales son liberadas en el medio sin ningún tratamiento, lo cual ha afectado considerablemente los recursos naturales disponibles, resaltando que la mejora en el manejo de dichos vertimientos generaría beneficios sociales, ambientales y económicos, ante los altos costos asociados a los sistemas de tratamiento (UNESCO, 2017). No obstante, la selección de un proceso de tratamiento adecuado para las condiciones de las aguas residuales dependerá de los cuerpos de agua receptores y de la posible reutilización de estas en procesos agrícolas o industriales, lo anterior con la finalidad de reducir la contaminación física, química y biológica que se está aumentando en las aguas superficiales

necesarias para la subsistencia de la población y la escases del recurso para las diferentes actividades humanas (González, Larios y Morales, 2015; Núñez, 2015).

Cabe mencionar que, en Colombia no se han establecido valores de referencia para el control de los vertimientos en cuanto a la concentración de nutrientes se refiere, exigiendo únicamente el análisis y reporte, tal como se presenta en el artículo 8 de la Resolución No. 0631 de 2015, que trata sobre los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de las aguas residuales (ARD y ARnD) de los prestadores del servicio público de alcantarillado a cuerpos de aguas superficiales con un carga mayor a 3000 Kg/día de DBO₅. En dicha norma solo se registran valores límites para los parámetros de pH, temperatura, demanda química (DQO) y bioquímica de oxígeno (DBO), (Resolución No. 0631, 2015, art. 8).

En consideración de la deficiencia en las normativas nacionales, en la presente investigación fue necesario acudir a normativas internacionales que permitieran obtener una referencia en cuanto a los límites permisibles de los parámetros inorgánicos en los vertimientos de aguas residuales, entre las que se menciona la Ley general sobre medio ambiente y recursos naturales de la república dominicana, como referente para los resultados de esta investigación (Ley 64-00, 2000).

1.2 Pregunta problema

La idea investigación surge de la necesidad de implementar un sistema de tratamiento terciario capaz de remover los nutrientes que no se eliminan en los tratamientos preliminares de las aguas residuales municipales. Teniendo en cuenta lo anterior, ¿Cuáles son las condiciones necesarias para que el sistema de filtración múltiple actúe como un tratamiento terciario de aguas residuales municipales?

2. Justificación

La importancia que ha adquirido la prevención de la contaminación del agua y la protección de la salud humana ha llevado al diseño y construcción de sistemas de tratamiento que sean eficientes en la remoción de contaminantes del agua residual y que garanticen una calidad adecuada del vertimiento, logrando minimizar los impactos ambientales generados (Armenteros, Hernández y Pérez, 2016). Por ello, la conformación de las tecnologías de tratamiento terciarias se ha enfocado en eliminar la carga orgánica del agua y las sustancias que no son removidas de forma eficiente en los tratamientos primarios y secundarios, como los nitratos, fósforo, patógenos, detergentes e incluso metales (BASF, 2017).

La formulación de los sistemas de tratamiento terciarios va de la mano con la mejora en la eficiencia de los procesos precedentes en la remoción de los contaminantes del agua residual, aminorando de esta forma las consecuencias adversas sobre la flora y la fauna de las corrientes de agua superficiales, ante los altos niveles de sustancias dañinas y carga orgánica (Morales, 2016). Dichas aguas reducen la calidad de las fuentes de agua superficiales, debido a la pérdida en su capacidad de autodepuración ante las altas concentraciones que reciben, perdiendo su condiciones naturales y la biodiversidad que acogen (Izquierdo, Menéndez y Quiroz, 2018).

Por ello, es preciso que las aguas residuales reciban un tratamiento adecuado antes de ser vertidas, mejorando de forma considerable sus condiciones físicas, químicas y microbiológicas, evitando la incidencia significativa sobre los ríos y lagos receptores, implementando los sistemas requeridos para que el efluente cumpla con los valores máximos permisibles establecidos en la normativa vigente. El grado de tratamiento requerido en cada caso para las aguas residuales municipales, deberá responder a las condiciones de los cuerpos de agua receptores en los cuales se haya producido su vertimiento, específicamente para el exceso de nutrientes, siendo

fundamental la realización de procesos terciarios que permitan conseguir su remoción (Pineda, 2017).

Para el tratamientos terciario de las aguas residuales municipales existen diversos procesos, los cuales consideran ciertos factores como la cantidad de agua, estimada por medio del consumo diario, y la calidad con la que son recibidas en las plantas de tratamiento, donde se lleva a cabo el análisis de la composición fisicoquímica de las mismas. Para que un tratamiento sea eficaz debe existir un balance entre el costo, el funcionamiento del sistema y el cumplimiento con respecto a los métodos que han sido escogidos para la implementación (Galeano y Rojas, 2016).

Entre los sistemas de tratamiento que han recibido atención por su alta eficiencia, se encuentran los reactores discontinuos secuenciales y los reactores continuos de lecho fijo, empleados a nivel de laboratorio e industrial, respectivamente, por los altos porcentajes de remoción en los nutrientes que han sido monitoreados; en el caso de los reactores discontinuos se garantiza el tratamiento mediante condiciones controladas y en los reactores continuos por la interacción del agua con un material adsorbente de los contaminantes ubicado en un lecho fijo (Jahn, Krampe y Svardal, 2019). De igual forma se encuentran una serie de investigaciones que mencionan la posibilidad de utilizar microalgas ante su capacidad de biodegradar los contaminantes y materiales bioadsorbentes para reducir las concentraciones presentes en el agua residual (Cheng et al., 2019; Morales, 2016).

Por medio de esta investigación se pretende buscar una alternativa de tratamiento terciario para las aguas residuales municipales de la ciudad de Barranquilla, previamente tratadas en la EDAR El Pueblo, con el propósito de garantizar un efluente que cumpla con lo establecido en la normativa vigente, realizando un principal énfasis en la remoción de nutrientes (nitratos, nitritos y fosfatos).

3. Objetivos

3.1 General

Implementar un reactor tipo Batch a escala piloto para el tratamiento terciario de aguas residuales municipales procedentes de la ciudad de Barranquilla.

3.2 Específicos

- ✓ Construir un reactor tipo Batch para el tratamiento terciario de aguas residuales municipales.
- ✓ Evaluar el funcionamiento del reactor a través del estudio de los parámetros fisicoquímicos.
- ✓ Identificar la eficiencia del sistema de tratamiento mediante un análisis estadístico de varianza entre los datos obtenidos.

4. Marco referencial

4.1 Estado del arte

De acuerdo con las investigaciones que se realizaron, se encontraron diferentes proyectos que se han realizado anteriormente y que guardan relación con el presente proyecto.

Los autores Navarro y Palladino (2008), evaluaron la eficiencia de degradación de materia orgánica mediante un reactor de lecho fluidizado, se usó como base carbón activado cubriendo el 38% del lecho, se operó con un caudal de 20 A 300 mL/min. Se construyó una columna de acrílico de 10 cm de ancho y 1,10 m de altura, se incorporó un aireador con un caudal de entre 1,5 y 2,5 L/min, con velocidad de fluidización de 0,3 a 1,01 cm/ s y altura de 40 a 60 m. se realizaron 24 ensayos, donde se midieron parámetro como DQO, temperatura y DBO₅. Se concluyó que la mayor eficiencia se dió en los procesos donde se manejaron bajos caudales y

máximas cargas orgánicas, alcanzando una eficiencia de remoción del 89% en la DQO, parámetro que ingreso con una concentración entre 74 y 571 mg/L (Navarro y Palladino, 2009).

El autor Morales (2016), realizó una investigación acerca del uso de microalgas para el tratamiento de aguas residuales en reactores abiertos, la cual se desarrolló en la estación experimental Cajamar “Las Palmerillas” que disponía de dos reactores a gran escala, llevando a cabo los ensayos con agua residual procedente de los tratamientos primario, secundario y lixiviados. El objetivo era determinar la posibilidad de utilizar microalgas y bacterias para depurar el efluente y validar la tecnología en condiciones reales de cultivo externo en reactores abiertos. La DQO entrante fue de 74,7 a 303 mg/L de concentración, la cual tuvo la mejor depuración con un porcentaje de remoción entre el 35 y el 95%, mayor crecimiento bacteriano y se obtuvo el consumo de mayor materia orgánica. El fósforo por otra parte se consumió en su totalidad, al eliminarse una concentración entre 6 a 20 mg/L en un porcentaje del 100% (Morales, 2016).

Como conclusión se identificó que el uso de consorcios de microalgas y bacterias son efectivos y pueden ser acoplados a sistemas actuales, ya sea como tratamiento terciario para la remoción de nitrógeno y fósforo residual, así como patógenos, o como tratamiento de los lixiviados. Adicionalmente este tipo de tratamientos constituye una alternativa interesante en términos de sostenibilidad y costos, garantizando la calidad de depuración y por tanto la seguridad de vertido del agua tratada (Morales, 2016).

En el trabajo denominado “Evaluación de la eficiencia de un reactor biológico secuencial en el tratamiento de efluentes de una planta procesadora de productos cárnicos”, se utilizó un reactor cilíndrico de 14,5 cm de diámetro, 26 cm de alto y un volumen total de 4 litros y efectivo de 2 litros, con un 30 % de biomasa y el resto en agua residual, las muestras de agua fueron recolectadas de una industria dedicada a la elaboración de productos cárnicos.

El reactor funcionó de manera automatizada mediante un sistema de bombeo, dispositivos reguladores de tiempo, agitación mecánica (15 w- 1300 rpm), aireación con oxígeno disuelto con una concentración de 2 mg/l. el reactor opero en 3 tiempos (7, 10 y 12 horas).

La concentración de DQO a la entrada del reactor de entre 494 y 763 mg/l, obteniendo un porcentaje de remoción de 87,4 a 98,2 %, en los cuales no hubo una notable diferencia entre los 3 tiempos, sin embargo, la mayor remoción se dio a las 12 horas del proceso, entre otros resultados se encontró que entre las horas 10 y 12 hubo mayor remoción de nitrógeno total. (Bernal, Carrasquero, Diaz y Rodríguez, 2018).

Perspectivas del tratamiento anaerobio de aguas residuales domésticas en países en desarrollo, investigación realizada por Patricia Torres en la ciudad de Bello Horizonte, Brasil en el año 2012. En países con grandes problemas de saneamiento y pocos recursos, como los que están en vías de desarrollo, se requieren plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas -PTARD- apropiadas y sostenibles; dado que estos países se localizan en general en regiones de clima tropical y subtropical (temperaturas superiores a 20°C), la digestión anaerobia es una tecnología clave que genera subproductos con valor agregado (bioenergía, nutrientes y agua para reúso). América Latina es la región con mayor número de PTARD anaerobias, siendo el reactor UASB el de mayor aplicación para el tratamiento del ARD; su implementación a escala tan grande como la de la PTARD Onça (Belo Horizonte, Brasil) demuestra que es una tecnología consolidada, con eficiencias de reducción entre 65 % y 80 % de DQO y TRH entre 6 y 10 horas (Torres, 2012).

En el trabajo denominado “Comparación y evaluación de tres plantas acuáticas para determinar la eficiencia de remoción de nutrientes en el tratamiento de aguas residuales domésticas”, estudio realizado por García (2012), Se presenta un estudio comparativo acerca de

la capacidad depuradora de nutrientes presentes en las aguas residuales, de tres plantas acuáticas flotantes, *Azolla filiculoides*, *Lemna minor* y *Eichhornia crassipes*; donde sus partes fotosintetizadores sobre la superficie del agua y sus raíces se extienden hacia abajo dentro de la columna de agua. Los experimentos realizados fueron los sistemas “por tandas” compuesto por un estanque y “de flujo continuo” compuesto por tres estanques, donde cada estanque posee un área de 30.2 dm². La primera fase de la investigación consistió en la aplicación de plantas acuáticas en monocultivo con *Lemna M.* y *Eichhornia C.* utilizando el efluente de las PTAR-CITRAR en Lima para analizar el efecto depurador de las plantas acuáticas, además se trabajó con un control (sin plantas), los cuales funcionaron como sistemas “por tandas”, donde el estanque en acuarios posee un área de 36.0 dm²; desarrollándose por la homogeneidad en el tamaño de los estanques. La segunda fase o técnica de esta investigación consistió en un flujo lento del efluente de la PTAR-CITRAR atravesando estanques con niveles de agua poco profundo, en las cuales plantas acuáticas flotantes (*Lemna M.* y *Eichhornia C.*) son cultivadas.

Los sistemas de flujo continuo se componen de tres estanques en el que además se implementó un sistema de filtros previo al tratamiento en estudio. En ambas fases, las plantas acuáticas mantienen las condiciones de degradación anaeróbica y aeróbica de la materia orgánica y sedimentos filtrados gracias a sus raíces, donde se desarrolla una intensa actividad de las bacterias. El objetivo principal fue determinar si el sistema de reactores con plantas acuáticas remueve nutrientes y observar si es un sistema adecuado y complementario con las plantas de tratamiento de aguas residuales convencionales existentes en nuestro país. “En el estudio realizado se observó que fue posible remover los nutrientes a un 90% como se esperaba pues estudios recientes hechos en el Perú y en América Latina que señalan eficiencia promedio del 95%” (García, 2012).

5. Marco conceptual

5.1 Agua residual

Las aguas residuales son aquellas que, al ser usadas por el hombre, representan un peligro y deben ser desechadas, debido a que contienen gran cantidad de sustancias y/o microorganismos.

Las aguas residuales son responsables del 80% de la morbilidad en los países en vía de desarrollo, esta situación se encuentra estrechamente relacionada con las bajas coberturas en alcantarillado y el inadecuado tratamiento y disposición final de las aguas residuales (OMS, 2018). Según su origen, las aguas residuales resultan de la combinación de líquidos y residuos sólidos transportados por el agua que proviene de residencias, oficinas, edificios e instituciones, junto con los residuos de las industrias y de actividades agrícolas, así como de las aguas subterráneas, superficiales o de precipitación que también pueden agregarse eventualmente al agua residual (Blazquez y Montero, 2010).

De acuerdo con su origen o procedencia, el ministerio de ambiente y desarrollo sostenible en la resolución 0631 del 2015 (Hamid y Ramli, 2017), clasifica las aguas residuales en: aguas residuales domesticas (ARD) y aguas residuales no domesticas (ARnD).

5.1.1 Aguas residuales domesticas (ARD).

Son las procedentes de los hogares, así como las de las instalaciones en las cuales se desarrollan actividades industriales, comerciales o de servicios y que corresponden a: Descargas de los retretes y servicios sanitarios. Descargas de los sistemas de aseo personal (duchas y lavamanos), de las áreas de cocinas y cocinetas, de las pocetas de lavado de elementos de aseo y lavado de paredes y pisos y del lavado de ropa (no se incluyen las de los servicios de lavandería industrial). “La contaminación principal de las aguas residuales domésticas es por materia

orgánica, tanto en suspensión como en disolución, normalmente biodegradables, y cantidades importantes de nitrógeno, fósforo y sales minerales” (Cyclus, 2018).

5.2 Características de las aguas residuales

El conocimiento de las características de las aguas residuales, ya que se deben saber las características del agua residual, para determinar el tipo de tratamiento que se va a realizar.

Existen tres características fundamentales que nos ayudan en el estudio de las aguas residuales, están son: Químicas, Físicas y Biológicas.

Los compuestos orgánicos e inorgánicos se encuentran en aguas residuales procedentes de instalaciones industriales diversas. A diferencia de las aguas residuales domésticas, los efluentes industriales contienen con frecuencia sustancias que no se eliminan por un tratamiento convencional, bien por estar en concentraciones elevadas, o bien por su naturaleza química. Muchos de los compuestos orgánicos e inorgánicos que se han identificado en aguas residuales industriales son objeto de regulación especial debido a su toxicidad o a sus efectos biológicos a largo plazo (Cyclus, 2018).

5.2.1 Características físicas.

Algunas de las características físicas de las aguas residuales urbanas son las siguientes:

5.2.1.1 Temperatura.

La temperatura de las aguas residuales es mayor que la de las aguas no contaminadas, debido a la energía liberada en las reacciones bioquímicas, que se presentan en la degradación de la materia orgánica. Las descargas calientes son otra causa de este aumento de temperatura (UDEP, 2016). Esta medición es importante ya que en los sistemas de tratamiento de aguas residuales hay

procesos biológicos que dependen de la temperatura. También afecta directamente las reacciones químicas y las velocidades de reacción, la vida acuática y procesos biológicos de los sistemas (Jin-Jie et al., 2013).

5.2.1.2 Turbidez.

“La turbidez, medida de la propiedad de transmisión de la luz del agua, es otro ensayo utilizado para indicar la calidad de los vertidos de aguas residuales con respecto a la materia suspendida” (Cortez, 2012). Se toma como una medida de las propiedades de la dispersión de la luz en el agua, usualmente se utiliza para indicar la calidad de las aguas naturales y las aguas residuales tratadas haciendo relación al material en suspensión. La medición se realiza por comparación entre la intensidad de luz dispersa en una muestra y la luz dispersa por suspensión de contraste en las mismas condiciones (Jin-Jie et al., 2013).

5.2.1.3 Color.

El color es un indicativo de la edad de las aguas residuales. El agua residual reciente suele ser gris; sin embargo, a medida que los compuestos orgánicos son descompuestos por las bacterias, el oxígeno disuelto en el agua residual se reduce y el color cambia a negro. En esta condición, se dice que el agua residual es séptica. El color se determina comparando el color de la muestra y el color que se produce por soluciones 4 de diferentes concentraciones de cloroplatinato de potasio (K_2PtCl_6) (Jin-Jie et al., 2013).

5.2.1.4 Olor.

El olor es debido a los gases producidos en la descomposición de la materia orgánica, sobre todo, a la presencia de ácido sulfhídrico y otras sustancias volátiles. El agua residual reciente tiene un olor peculiar algo desagradable, pero más tolerable que el del agua residual séptica

(Cortez, 2012). El olor del agua residual se genera por una gran variedad de compuestos malolientes que son liberados cuando se produce degradación biológica bajo condiciones anaerobias de las aguas. El principal compuesto es el sulfuro de hidrógeno, aunque se generan otros compuestos que producen olores más fuertes como indol, eskatol y mercaptanos (Jin-Jie et al., 2013).

5.2.1.5 Sólidos totales.

“Los sólidos totales presentes en el agua residual se clasifican según su tamaño o presentación en sólidos suspendidos y sólidos filtrables” (Council, 2016).

5.2.1.6 Sólidos suspendidos.

Son las partículas flotantes, como trozos de vegetales, animales, basuras, etc., y aquellas otras que también son perceptibles a simple vista y tienen posibilidades de ser separadas del líquido por medios físicos sencillos. Dentro de los sólidos suspendidos se pueden distinguir los sólidos sedimentables, que se depositarán por gravedad en el fondo de los receptores. Estos sólidos sedimentables, son una medida aproximada de la cantidad de fango que se eliminará mediante sedimentación (UDEP, 2016).

5.2.1.7 Sólidos filtrables.

Esta fracción se compone de sólidos coloidales y disueltos. La fracción coloidal consiste en partículas con un diámetro aproximado que oscila entre 10^{-3} y 1 micra. Esta fracción no puede eliminarse por sedimentación. Los sólidos disueltos se componen de moléculas orgánicas, moléculas inorgánicas y iones que se encuentran disueltos en el agua. Por lo general, se requiere una coagulación seguida de sedimentación para eliminar estas partículas de la suspensión (Cortez, 2012).

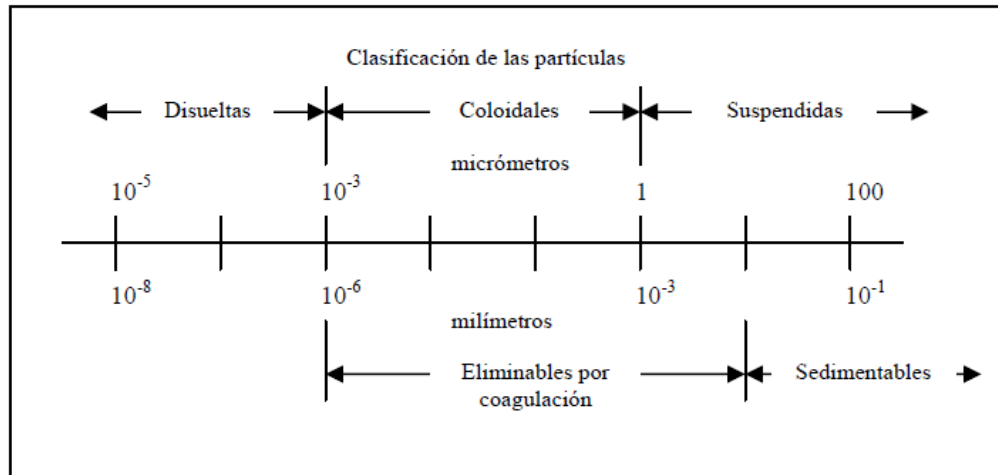


Figura 1. Clasificación de las partículas sólidas contenidas en un agua residual según su diámetro. Fuente: UDEP, 2016.

5.2.1.8 Conductividad.

“Es la medida de la capacidad de una solución para transmitir la corriente eléctrica.

Actualmente la importancia de este parámetro es para determinar la posibilidad de uso de una para riego. Esta se expresa en microohms por centímetro” (Jin-Jie et al., 2013).

5.2.2 Características químicas.

Las características químicas estarán dadas, principalmente, en función de los desechos que ingresan al agua servida. Existen una serie de parámetros que tienen una especial importancia para describir composición de las aguas residuales. Los constituyentes químicos dentro de las aguas residuales frecuentemente se clasifican en inorgánicos y orgánicos. Los compuestos inorgánicos incluyen elementos individuales y una variedad de nitratos y sulfatos. Los constituyentes inorgánicos de mayor interés comprenden nutrientes, compuestos no metálicos, metales y gases. En el caso de los compuestos orgánicos no pueden ser clasificados de forma separada; son de vital importancia en el tratamiento, vertido y reutilización de aguas residuales de la misma manera los compuestos orgánicos específicos (Jin-Jie et al., 2013).

5.2.2.1 Materia orgánica.

La materia orgánica está compuesta en un 90% por carbohidratos, proteínas, grasas y aceites provenientes de excrementos y orina de seres humanos, restos de alimentos y detergentes. Estos contaminantes son biodegradables, es decir, pueden ser transformados en compuestos más simples por la acción de microorganismos naturales presentes en el agua, cuyo desarrollo se ve favorecido por las condiciones de temperatura y nutrientes de las aguas residuales domésticas. La urea, principal constituyente de la orina, es otro importante compuesto orgánico del agua residual. En razón de la rapidez con que se descompone, la urea es raramente hallada en un agua residual que no sea muy reciente. El agua residual contiene también pequeñas cantidades de moléculas orgánicas sintéticas como agentes tenso activos, fenoles y pesticidas usados en la agricultura. Hay una serie de parámetros que son de gran interés en el tratamiento de las aguas residuales, puesto que, nos permiten conocer el contenido en materia orgánica de éstas (López, 2013). Los más importantes son:

5.2.2.1.1 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO).

Es la cantidad de oxígeno que necesitan los microorganismos para degradar la materia orgánica presente en el agua. Esta prueba se realiza durante 5 o 3 días a 20°C por lo que se expresa como DBO o DBO₅, respectivamente. Se puede obtener mediante determinación de la concentración de oxígeno disuelto de la medida de la DBO₅, es el procedimiento manométrico basado en el respirómetro de Warburg. El CO₂ desprendido determinación de DBO₅. En la oxidación de la materia orgánica, es absorbido mediante NaOH o LiOH que se coloca en un recipiente en el tapón de las botellas; como consecuencia, se produce un descenso de presión que es registrado en un manómetro de mercurio, cuya escala viene expresada en mg/l de oxígeno consumido (López, 2013).



Figura 2. Determinación de la DBO5. Determinación manométrica de la disminución de presión por el consumo del oxígeno por parte del agua. Fuente: Alcaraz, 2017.

5.2.2.1.2 Demanda química de oxígeno (DQO).

“Mide la cantidad de materia orgánica del agua, mediante la determinación del oxígeno necesario para oxidarla, pero en este caso proporcionado por un oxidante químico como el permanganato potásico o el dicromato potásico” (Cortez, 2012). Este parámetro no puede ser menor que la DBO, ya que es mayor la cantidad de sustancias oxidables por vía química que por vía biológica. Habitualmente se realiza la determinación con permanganato en las aguas para consumo, denominándose oxidabilidad al permanganato, mientras que en las aguas residuales se realiza con dicromato, llamándose más propiamente DQO (Council, 2016).

5.2.2.1.3 Carbono orgánico total (COT).

Se mide mediante la introducción de una cantidad conocida de muestra en un horno a alta temperatura. El carbono orgánico se oxida a CO_2 , en presencia de un catalizador, y se cuantifica

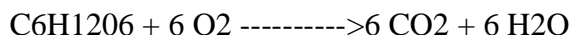
mediante un analizador de infrarrojos. Pero como no se oxidan todos los componentes orgánicos presentes, los valores de COT dan una estimación de carbono orgánico inferior a la real (Johnny Torres Medina, 2016).

5.2.2.1.4 Demanda total de oxígeno (DTO).

Esta prueba se realiza en una cámara de combustión catalizada con platino, en la cual se produce una transformación de la materia orgánica en productos finales estables. El oxígeno residual es analizado por cromatografía gaseosa, y por diferencia obtenemos la DTO (Johnny Torres Medina, 2016).

5.2.2.1.5 Demanda teórica de oxígeno (DTeO).

“Se estima mediante una reacción teórica de oxidación total. Para ello, es necesario conocer la composición de las aguas residuales en carbohidratos, proteínas y grasas” (López, 2013). Si tomamos la glucosa como ejemplo, sería:



$$\text{DTeO} = 6 \text{ moles de O}_2/\text{mol de glucosa} = 6 \times 32 = 192 \text{ g O}_2/\text{mol}.$$

5.2.2.2 Materia inorgánica.

Se incluyen en este grupo todos los sólidos de origen generalmente mineral, como son sales minerales, arcillas, lodos, arenas y gravas no biodegradables. En la tabla 3.1 se presenta la relación entre algunos constituyentes inorgánicos y el agua residual. Los componentes inorgánicos de mayor interés, en las aguas residuales, son:

5.2.2.2.1 *pH.*

La actividad biológica se desarrolla dentro de un intervalo de pH generalmente estricto. Un pH que se encuentre entre los valores de 5 a 9, no suele tener un efecto significativo sobre la mayoría de las especies, aunque algunas son muy estrictas a este respecto. Un aspecto importante del pH es la agresividad de las aguas ácidas, que da lugar a la solubilización de sustancias por ataque a los materiales (Holistic, 2015). De este modo, un efluente con pH adverso puede alterar la composición y modificar la vida biológica de las aguas naturales. También es más difícil de tratar por métodos biológicos, que sólo pueden realizarse entre valores de pH de 6,5 a 8,5. Las aguas residuales urbanas suelen tener un pH próximo al neutro.

Aparte del efecto directo, el pH tiene un efecto indirecto, influenciando la toxicidad de algunas sustancias, especialmente de aquellas en las que, la toxicidad depende del grado de disociación.

5.2.2.2.2 *Cloruros.*

Se consideraban como indicador indirecto de contaminación fecal, ya que el hombre elimina unos 6 gr de cloruros al día aproximadamente en las excretas. Pero los cloruros pueden tener otras procedencias, como son la infiltración de aguas marinas, en los acuíferos subterráneos próximos al mar, y también pueden aparecer debido al uso de sustancias ablandadoras, en los tratamientos del agua de abastecimiento, cuando la dureza de ésta es elevada, por lo que en la actualidad los cloruros han perdido todo valor como indicador de contaminación fecal (Holistic, 2015).

5.2.2.2.3 *Alcalinidad.*

Nos mide la cantidad de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos presentes en el agua. Estos iones se neutralizan con elementos como el calcio, magnesio, sodio, potasio, amoníaco, etc. El agua residual suele tener un cierto grado de alcalinidad, cuyo origen es el agua de suministro y el aporte por las sustancias de uso doméstico (SINIP, 2012).

5.2.2.2.4 *Nitrógeno.*

Es esencial para el crecimiento de microorganismos y plantas; la limitación de nitrógeno puede producir cambios en la composición bioquímica de los organismos, y reducir sus tasas de crecimiento. Pero, también el nitrógeno es un contribuyente especial para el agotamiento del oxígeno y la eutrofización de las aguas receptoras, cuando se encuentra en altas concentraciones. Estas altas concentraciones pueden ser resultado de la fertilización en la agricultura, mediante fertilizantes artificiales y abonos animales, y si se filtran a las aguas subterráneas, constituyen un problema para los abastecimientos de agua (Holistic, 2015).

El nitrógeno está presente en el agua residual reciente en forma de urea y proteínas, pero estos compuestos son fácilmente degradables por las bacterias, que los transforman en amonio, y a partir de él producen nitritos y nitratos. Al ser el amoníaco el primer producto de la degradación de la urea y del material proteico, se puede considerar como producto de la degradación de la urea y del material proteico, se puede considerar como el mejor indicador químico indirecto de contaminación fecal reciente. Hay algunas especies que utilizan el amonio preferentemente al nitrato, cuando ambos están disponibles; e incluso, el amonio puede inhibir la captación de nitratos por los organismos. Sin embargo, el amonio resulta tóxico para algunas especies de microorganismos, sobre todo en forma de NH_3 , porque está descargado y es soluble en los

lípidos, por lo que puede atravesar las membranas biológicas más rápidamente. Esto puede interferir el tratamiento biológico de las aguas residuales.

“Las conversiones entre las distintas formas del nitrógeno, están influenciadas por el pH y la temperatura del medio” (SINIP, 2012).

5.2.2.2.5 *Nitritos.*

Se suelen considerar como indicadores indirectos de contaminación fecal. Son inestables y se oxidan fácilmente a nitratos. Su ausencia en el medio puede deberse a condiciones anóxicas, que obliguen a los microorganismos a utilizar el oxígeno ligado, llevando el hidrógeno a formas más reducidas (SINIP, 2012).

5.2.2.2.6 *nitratos.*

Son la forma más oxidada del nitrógeno que se encuentra en las aguas residuales. Su aumento creciente en las aguas subterráneas es preocupante, ya que, puede alcanzar las fuentes de agua de bebida y llegar a ocasionar graves enfermedades, como la metahemoglobinemia infantil y el aumento en la incidencia de cáncer.

5.2.2.2.7 *Fósforo.*

Es también esencial para el crecimiento de los organismos. Las formas en que se puede encontrar en las aguas residuales son ortofosfato, polifosfato y fosfato orgánico. El fosfato satisface los requerimientos de fósforo de todos los organismos y se necesita en niveles mucho más bajos que el nitrógeno. Al igual que éste, es responsable de la producción de procesos de eutrofización (SINIP, 2012).

Tabla 1*Relación entre algunos constituyentes inorgánicos y el agua residual*

Elemento	Relación con el agua residual
Hidrógeno (pH)	El intervalo de concentración idóneo para la existencia de la mayoría de la vida biológica es muy estrecho y crítico. El agua residual con una concentración adversa de ion hidrógeno es difícil de tratar por medios biológicos. Por lo general, el pH óptimo para el crecimiento de los organismos se encuentra entre 6.5 y 7.5.
Cloruros	Proceden de la disolución de suelos y rocas que los contienen y que están en contacto con el agua, intrusión del agua salada (zonas costeras), agua residual doméstica, agrícola e industrial. Suministra información sobre el grado de concentración del agua residual.
Nitrógeno	Nutriente esencial para el crecimiento de protistas y plantas. Básico para síntesis de proteínas.
Fósforo	Incrementa la tendencia de proliferación de algas en el receptor. Íntimamente ligado, igual que el nitrógeno, al problema de la eutrofización.
Azufre	Requerido en la síntesis de las proteínas y liberado en su degradación.

Fuente (Johnny Torres Medina, 2016).

5.2.3 Características biológicas.

Las características biológicas tienen una alta importancia en el control de enfermedades que sean causadas por organismos patógenos de origen humano y por la proliferación o desarrollo de bacterias y otros microorganismos dentro de la descomposición y estabilización de la materia orgánica tanto en el medio natural como en una planta de tratamiento de aguas residuales (Johnny Torres Medina, 2016).

Tabla 2

Constituyentes del agua residual doméstica

Contaminantes	Unidades	Concentración		
		DEBIL	MEDIA	FUERTE
Solidos totales (ST)	Mg/l	350	720	1200
Disueltos totales	Mg/l	250	500	850
Sólidos en suspensión (SS)	Mg/l	100	220	350
Solidos sedimentables	Mg/l	5	10	20
DBO5, 20°C	Mg/l	110	220	400
COT	Mg/l	80	160	290
DQO	Mg/l	250	500	100
Nitrógeno	Mg/l	20	40	85
Orgánico	Mg/l	8	15	35
Amoniac libre	Mg/l	12	25	50
Nitritos	Mg/l	0	0	0
Nitratos	Mg/l	0	0	0
Fosforo	Mg/l	44	8	15
orgánico	Mg/l	1	3	5
Inorgánico	Mg/l	3	5	10
Cloruros	Mg/l	30	50	100
Sulfatos	Mg/l	20	30	50
Alcalinidad (CaCO3)	Mg/l	50	100	200
Grasas	Mg/l	50	100	150
Coliformes totales	nº/100 ml	$10^8 - 10^7$	$10^7 - 10^8$	$10^7 - 10^9$

COVs	Ug/l	<100	100-400	>400
------	------	------	---------	------

Fuente (Flez, 2009).

5.2.4 Tratamiento de las aguas residuales

“Uno de los aspectos a considerar a la hora de realizar un vertido es que no se supere el poder de autodepuración del medio receptor para evitar efectos indeseables que dan lugar a una peor calidad” (Cortez, 2012).

Un sistema de tratamiento o estación depuradora de aguas residuales (EDAR) es una instalación donde el agua sucia, o residual, es sometida a un proceso mediante el cual, por una combinación de diversos tratamientos físicos, químicos y/o biológicos se consigue eliminar la materia en suspensión, así como las sustancias coloidales y finalmente las sustancias disueltas que contiene. Todo esto para alcanzar unos niveles acordes con la normativa vigente y proporcionar una correcta integración de esta agua residual con el entorno, y obtener los mejores rendimientos posibles (Holistic, 2015).

El tipo de tratamiento depende de las características del residuo líquido. Las aguas de desechos provenientes de usos industriales requerirán tratamientos más exigentes que los necesarios para los de origen doméstico; así mismo, las provenientes de uso agropecuario requerirán tratamientos especiales por la presencia de residuos orgánicos en concentraciones considerables. En algunos casos las aguas pueden ser tratadas en una sola planta, de acuerdo a sus características y según consideraciones económicas (Alcaraz, 2017).

El diseño eficiente y económico de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) requiere de un cuidadoso estudio basado en aspectos, tales como: el caudal (m^3/s), el uso final del producto final (agua tratada), el área disponible para la instalación, la viabilidad económica, características meteorológicas (temperatura, precipitación). En tal sentido, teniendo en mente que la solución tecnológica más adecuada es aquella que optimiza la eficiencia técnica en la forma más simple y menos costosa, la tecnología debe hacer uso de los recursos humanos y materiales disponibles en el país. Asimismo, cabe

señalar que la selección de los procesos y/o el tipo de planta serán diferentes dependiendo de cada caso específico (Bach. Heidy Stephany Victoria Díaz Pérez, 2015). Sin embargo, el proceso usual para el tratamiento de aguas residuales domésticas por lo general se divide en las siguientes etapas: Pre tratamiento, Tratamiento primario o físico, Tratamiento secundario o biológico, Tratamiento terciario que se emplea para separar la materia residual de los efluentes de procesos de tratamiento biológico, a fin de prevenir la contaminación de los cuerpos de agua receptores, o bien, obtener la calidad adecuada para el reusó, factor de importancia en la planeación de recursos hidráulicos donde el abastecimiento de agua potable es limitado. Dicho tratamiento será el utilizado en nuestra investigación.

5.2.4.1 Tratamiento Terciario.

Los objetivos del tratamiento terciario son eliminar la carga orgánica remanente de un tratamiento secundario, eliminar microorganismos patógenos, eliminar color y olor indeseables, remover detergentes, fosfatos y nitratos residuales, que ocasionan espuma y eutrofización respectivamente. La cloración es parte del tratamiento terciario o avanzado que se emplea para lograr un agua más pura, incluso hasta llegar a potabilizarla si se desea (Bach. Heidy Stephany Victoria Díaz Pérez, 2015).

En el tratamiento de aguas servidas, es importante tener en cuenta el manejo de los lodos provenientes de los tratamientos primario y secundario. Estos lodos, tienen un valor económico cuantificado al ocasionar daños al medio ambiente (Salazar, 2013) (Bach. Heidy Stephany Victoria Díaz Pérez, 2015).

Para estabilizar estos lodos, es decir, destruir las bacterias patógenas y volverlos inocuos al medio ambiente, el lodo se concentra por sedimentación y coagulación-floculación durante el tratamiento secundario. Este lodo, así concentrado, se puede tratar con cal como bactericida y eliminar el agua mediante exposición al sol, filtros de arena, filtros al vacío o centrifuga. Sin embargo, estas técnicas poseen costos elevados y problemas técnicos.

“El lodo deshidratado puede disponerse en vertederos, incinerarlo, o lo más deseable, usarlo como fertilizante y acondicionador del suelo, aunque su composición limita este empleo” (Bach. Heidy Stephany Victoria Díaz Pérez, 2015).

5.2.4.1.1 *Zanjón de oxidación.*

“El zanjón de oxidación lo desarrollo Pasveer en 1953, en Holanda, y dos años después se puso en operación el primer prototipo en voorschoten. En 1956, en nittenan, se construyó el primer zanjón alemán” (Romero, 2002).

El objetivo principal de su desarrollo fue proveer un método de tratamiento de aguas residuales de costo mínimo, e inicialmente los rotores se instalaron en zanjones excavados en tierra, los primeros zanjones de oxidación, de los estados unidos se construyeron a comienzos de década de los setenta, principalmente para el tratamiento de caudales ente 1 l/s y 1,8 m³/s (Romero, 2002).

“El zanjón de oxidación puede ser una alternativa económica en poblaciones medianas, de 1000 a 60000 habitantes, que dispongan de suministro eléctrico confiable y donde la disponibilidad de terreno es escasa y su costo alto” (Romero, 2002).

Zanjón de oxidación es un proceso de lodos activados del tipo de aireación prolongada, que usa un canal cerrado, con dos curvas, para la aireación y mezcla. Usa aireadores mecánicos del tipo de cepillos horizontales, de jaula o de discos (Romero, 2002).



Figura 3. Zanjón de oxidación. Fuente: Empresa De Servicios Públicos De El Rosal, 2016.

5.2.4.1.2 Aireación prolongada.

La aireación prolongada se enmarca dentro los procesos de fangos activos. En él, el agua residual, tras una etapa de tratamiento (desbaste, desarenado y desengrasado) se introduce en una cuba de aireación o reactor biológico en el que se mantiene un cultivo bacteriano en suspensión - denominado licor mezcla- y formado por un gran número de microorganismos agrupados en flóculos o grumos.

En caso de que la biomasa permanezca en el sistema por un periodo más largo, del orden de 18 a 30 días (de allí el nombre de aireación prolongada) recibiendo la misma carga de DBO del agua residual cruda que el sistema convencional, habrá menor disponibilidad de alimento de bacterias. La cantidad masa-de biomasa (kgSSVTA) es mayor que en el sistema de lodos activados convencional, el volumen del reactor aerobio es también más elevado, y el tiempo de retención del líquido oscila entre 16 y 24 horas, por lo tanto, hay menos materia orgánica por unidad de volumen del tanque de aireación y también por unidad de biomasa de reactor. Como

consecuencia, las bacterias, para sobrevivir, pasan a utilizar de forma más intensa en sus procesos metabólicos la propia materia orgánica biodegradable componente de sus células. Esta materia orgánica celular es convertida en gas carbónico y agua a través de la respiración. Esto corresponde a una estabilización de la biomasa que ocurre en el propio tanque de aireación (Sperling, 2014).

5.2.4.2 *Tratamientos aeróbicos y anaeróbicos.*

5.2.4.2.1 Tratamientos aeróbicos.

5.2.4.2.1.1 Lagunas Aireadas.

Son embalses de agua servida que ocupan una gran superficie de terreno, por lo que se emplean cuando éste es un bien barato. El agua servida así dispuesta se oxigena mediante aireadores superficiales o difusores sumergidos para generar oxidación bacteriana. Estos dispositivos crean una turbulencia que mantiene la materia en suspensión. El tiempo de residencia normal de este proceso es de 3 a 6 días, tiempo en que las bacterias poseen un crecimiento acelerado, dependiendo de las condiciones climáticas y suponiendo una aireación suficiente. La separación de sólidos de este tratamiento se logra por decantación que demora de 6 a 12 horas. La calidad del efluente de este proceso es inferior al de lodos activados, cuya diferencia fundamental es que en el primero no hay recirculación de lodos (Bach. Heidy Stephany Victoria Díaz Pérez, 2015).

5.2.4.2.1.2 Proceso de Lodos Activados.

El agua servida aireada se mezcla con bacterias aeróbicas que se han desarrollado con anterioridad. A diferencia del anterior, la mezcla del agua servida, previamente decantada, se agita por medio de bombas para que la materia esté en suspensión y en constante contacto con

oxígeno en el interior de piscinas de concreto armado. La materia orgánica degradada del agua servida flocula, por lo que luego se puede decantar. Una parte de la biomasa sedimentada se devuelve al tratamiento biológico, para mantener una población bacteriana adecuada, y el resto se separa como lodo. La siguiente imagen muestra un esquema de un proceso de lodos activados:

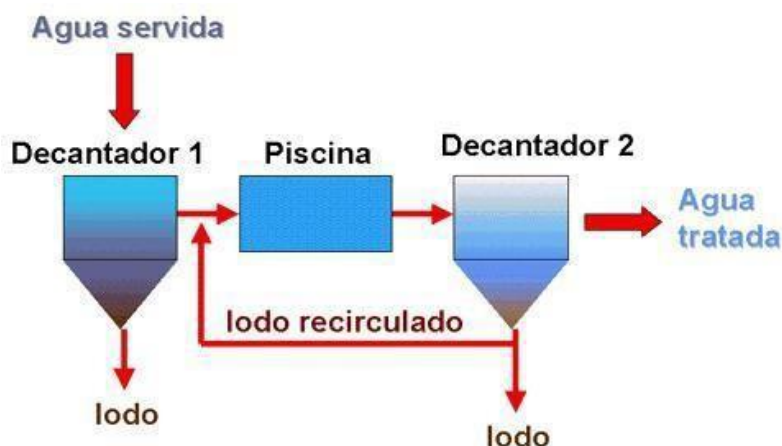


Figura 4. Proceso de lodos activados.

Fuente (Bach. Heidy Stephany Victoria Díaz Pérez, 2015)

“Las ventajas principales de este proceso son el corto tiempo de residencia de la biomasa en las piscinas (6 horas), permitiendo tratar grandes volúmenes en espacios reducidos y la eficiencia en la extracción de las materias suspendidas” (Bach. Heidy Stephany Victoria Díaz Pérez, 2015).

5.2.4.3 Tratamientos anaeróbicos

También podemos considerar en los procesos anaerobios que consiste en una serie de procesos microbiológicos que ocurren dentro de un recipiente hermético, que realizan la digestión de la materia orgánica con producción de metano. Pueden intervenir diferentes tipos de microorganismos, pero es desarrollado principalmente por bacterias. Ejemplos de tratamientos anaeróbicos son los tanques sépticos y los reactores anaerobios que tratan el agua en un sistema

sin luz, oxígeno ni movimiento. Las ventajas principales serían que generalmente requiere de instalaciones menos costosas, y no hay necesidad de suministrar oxígeno, por lo que el proceso es más barato y el requerimiento energético es menor. Produce una menor cantidad de lodos (el 20% en comparación con un sistema de lodos activos).

Por otro lado, su desventaja sería que es más lento que el tratamiento aeróbico, es decir, requiere un mayor tiempo de contacto o retención hidráulica, así como más tiempo de aclimatación, lo que impide el tratamiento de grandes volúmenes de aguas servidas (Bach. Heidy Stephany Victoria Díaz Pérez, 2015).

En términos generales, se registran tres generaciones de reactores anaerobios, las cuales se caracterizan porque en cada generación se reduce el tiempo de retención hidráulico (TRH) y mejora el contacto entre el lodo y el sustrato, lo cual significa menores volúmenes de reactor, costos más bajos, sistemas más estables y de más fácil operación (Bach. Heidy Stephany Victoria Díaz Pérez, 2015).

5.2.4.3.1 Reactores de primera generación.

“El tiempo de retención celular es igual al TRH, por lo que se requieren TRH muy altos, existe un contacto inadecuado entre la biomasa y la materia orgánica - Lagunas Anaerobias, Tanque Séptico, Tanque Imhoff” (Bach. Heidy Stephany Victoria Díaz Pérez, 2015).

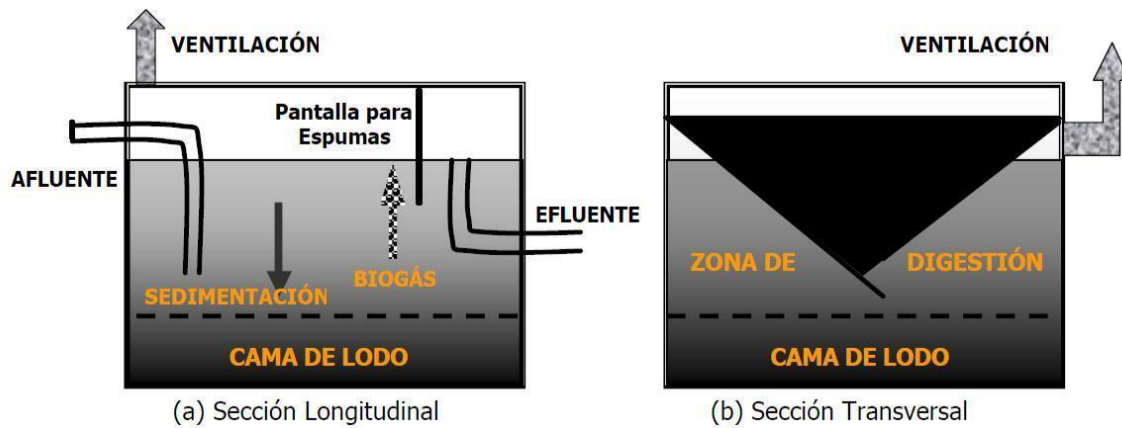


Figura 5 Tanques de digestión anaeróbica

Fuente (Johnny Torres Medina, 2016)

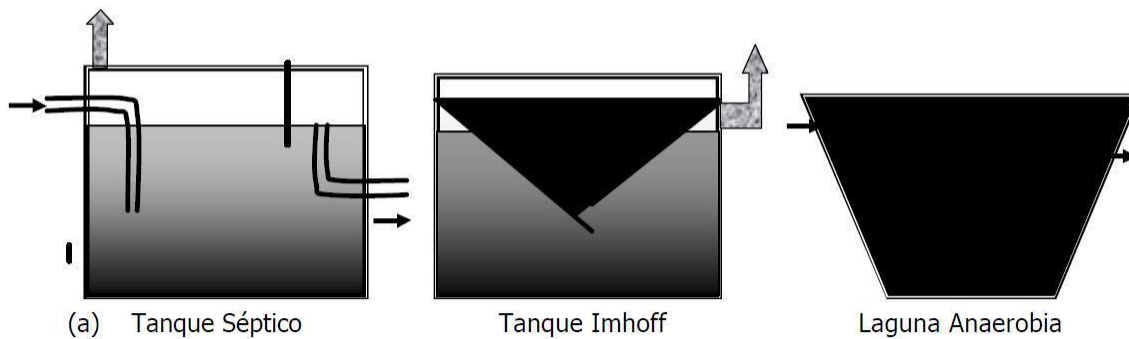


Figura 6 Sistemas anaeróbicos: primera generación

Fuente (Johnny Torres Medina, 2016)

5.2.4.3.2 Reactores de segunda generación.

Se caracterizan por el hecho de que tienen mecanismos para retención de los lodos, independizando el tiempo de retención celular del TRH. Los dos mecanismos más aplicados son: Inmovilización del lodo por adhesión a material sólido - Filtros anaerobios de flujo ascendente y descendente; Separación líquido-sólido del efluente, con el retorno de los sólidos separados al reactor – RAFA o UASB, el cual usa un Sedimentador interno.

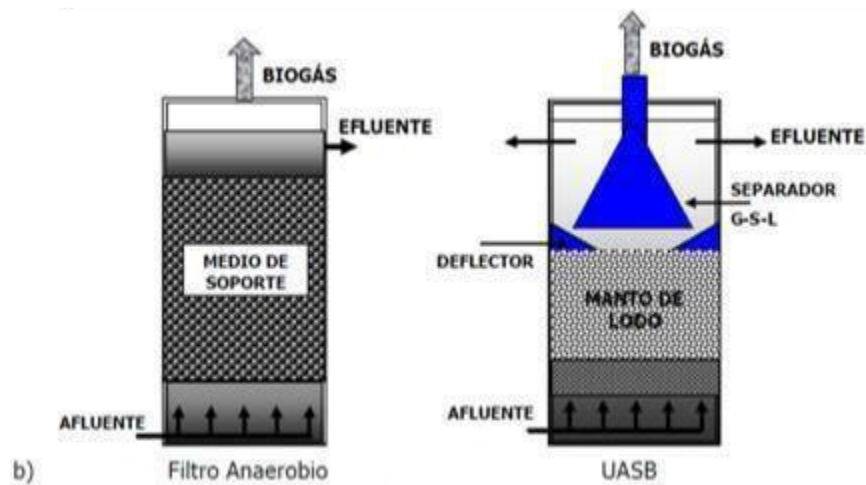


Figura 7 Sistemas anaeróbicos: segunda generación

Fuente (Johnny Torres Medina, 2016)

5.2.4.3.3 Reactores de tercera generación.

“Para optimizar el contacto entre el sustrato y la biomasa, esta se adhirió con partículas de arena, alúmina o plástico, las cuales se expanden - Reactores de lecho fluidizado o expandido” (Bach. Heidy Stephany Victoria Díaz Pérez, 2015).

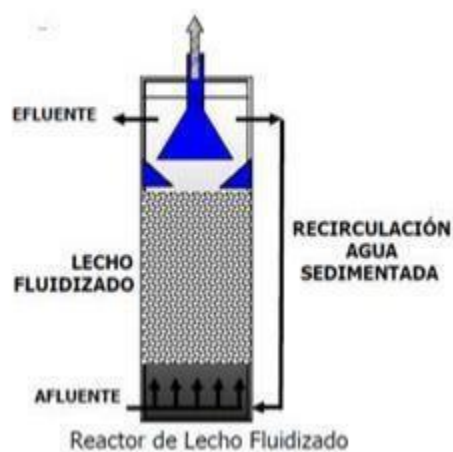


Figura 8 Sistemas anaeróbicos: tercera generación.

Fuente (Johnny Torres Medina, 2016)

5.2.4.3.4 Eutrofización.

Es un proceso que se puede dar de forma natural, pero que puede estar también provocado por la acción del hombre, mediante vertidos ricos en fósforo y nitrógeno. Estos compuestos se encuentran, principalmente, en las excretas y los detergentes, aunque también puede haber contribución de la escorrentía agrícola.

“Estos compuestos estimulan el crecimiento desmedido de microflora que puede causar problemas al alterar los caracteres organolépticos y dificultar los tratamientos, restringiendo, así, la utilización de estas aguas” (Salazar, 2013).

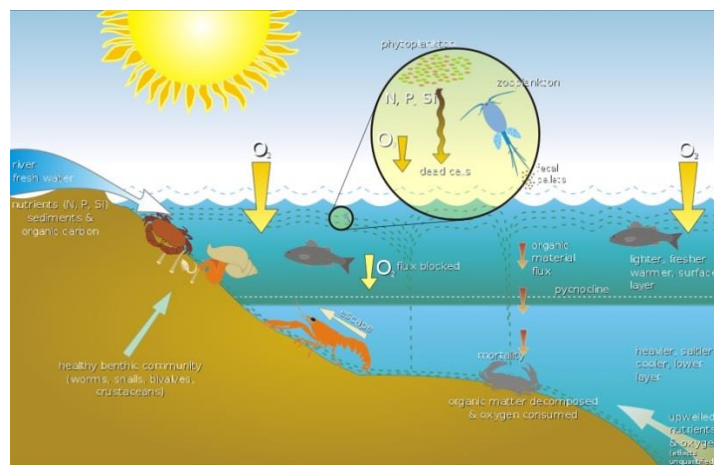


Figura 9. Efectos de la eutrofización sobre la vida béntica marina

Fuente (Triplénlace, 2012)

El reactor anaerobio es el elemento clave que nos permitirá eliminar el exceso de fósforo en el agua, de modo que estos nutrientes sean asimilados por las bacterias y se obtenga así un agua limpia de estos elementos.

5.2.4.3.5 *Causas.*

Existen varios causantes de la eutrofización derivados de la actividad humana. El más importante a nivel global es la agricultura debido al uso de fertilizantes, fundamentalmente nitratos, que a menudo se usan sin el cuidado y la medida adecuados y acaban en las aguas superficiales o subterráneas por lixiviación y arrastre desde de esos fertilizantes desde las tierras en las que se emplearon. La agricultura produce una eutrofización de carácter eminentemente difuso, subiendo la concentración de nutrientes en zonas amplias de lagos, ríos, marismas, estuarios y zonas costeras (TRIPLÉN LACE, 2012).

Otra actividad rural con una gran incidencia en la eutrofización es la ganadería. Los excrementos de los animales son ricos en nutrientes, sobre todo en los de carácter nitrogenado (amonio). Si no se gestionan de forma adecuada pueden acabar produciendo vertidos a las aguas próximas que cuando se producen suelen tener un carácter puntual.

Del modo similar a la ganadería los residuos urbanos pueden producir eutrofización, aunque en este caso hay que añadir el posible uso de detergentes con fosfatos que son unos de los nutrientes que pueden originar la eutrofización y de consecuencias especialmente perniciosas en las aguas.

La actividad industrial también puede ser origen de nutrientes que puedan producir focos de eutrofización puntual. En el caso de la industria se pueden producir vertidos tanto de productos nitrogenados como fosfatados entre otros muchos tóxicos. Al igual que la eutrofización causada por los residuos de origen urbano tienen un carácter eminentemente puntual, afectando, cuando se producen, a zonas concretas con mucha intensidad (TRIPLÉN LACE, 2012).

5.2.4.3.6 *Efectos.*

Los efectos de la eutrofización se producen a nivel local y regional normalmente. Desde un punto de vista sistémico, aumenta la producción primaria (fotosíntesis), aumenta la biomasa, pero disminuye la diversidad y quedan alteradas drásticamente la composición, estructura y dinámica de los ecosistemas afectados.

Efectos más específicos son por ejemplo la desecación de lagunas por el depósito durante largas temporadas de sedimentos y restos orgánicos sobre los que crece la vegetación, transformándose la laguna en pantano y luego en bosque o pradera. Este proceso se lleva a cabo durante largos periodos de tiempo a menudo de forma natural y se denomina colmatación (TRIPLÉN LACE, 2012).

Mientras, para la eliminación de nitratos el proceso es diferente, ya que es necesario un procedimiento de alternancia de etapa anaerobia y aerobia. En el caso de los nitratos, se produce una amonificación de los elementos orgánicos del nitrógeno al tratar el agua en la primera etapa (anaerobia) del proceso, por lo que se necesita proceder a la nitrificación, en una segunda etapa, donde las protagonistas son las bacterias aerobias. Una vez conseguido esto, se lleva a cabo la desnitrificación biológica, que permite eliminar los nitratos a través de las bacterias anaerobias, que actúan de nuevo consiguiendo que el nitrato se transforme en CO_2 y N_2 , ya descompuesto en estos elementos son aireados a la atmósfera (Agua, 2016).

6. Marco legal

A continuación, se presenta una síntesis de la normativa nacional e internacional vigente relacionada con los sistemas para tratamiento de aguas residuales y su respectivo cumplimiento:

6.1 Internacional

6.1.1 Ley General sobre Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Santo Domingo, República Dominicana 2000 Publicación Oficial (Ley 64-00).

6.2 Nacional

6.2.1 Resolución No. 1076 de 2015.

“Por medio del cual se expide el decreto único reglamentario del sector ambiente y desarrollo sostenible”.

6.2.2 Resolución No. 631 de 2015.

“Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones.”

“CAPITULO V: parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales domésticas, (ARD) y de las aguas residuales (ARD – ARND) de los prestadores del servicio público de alcantarillado a cuerpos de aguas superficiales.

Valores límites máximos permisibles para aguas residuales domésticas (ARD) de las soluciones individuales de saneamiento de viviendas unifamiliares o bifamiliares”

6.2.3 Resolución No. 1207 del 2014.

“Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas.”

6.2.4 Resolución No. 1514 de 2012.

“Se adoptan los Términos de Referencia para la Elaboración del Plan de Gestión de Riesgo para el Manejo de Vertimientos – PGRMV”.

6.2.5 Decreto No. 1541 de 1978.

“CAPITULO II: PRESERVACION DE LAS AGUAS.

Sección I: Control de vertimientos ARTICULO 211. Se prohíbe verter, sin tratamiento, residuos sólidos, líquidos o gaseosos, que puedan contaminar o eutroficar las aguas, causar daño o poner en peligro la salud humana o el normal desarrollo de la flora o fauna, o impedir u obstaculizar su empleo para otros usos.

7. Diseño metodológico

En la ilustración 10 se muestra el resumen de la metodología implementada en la presente investigación.

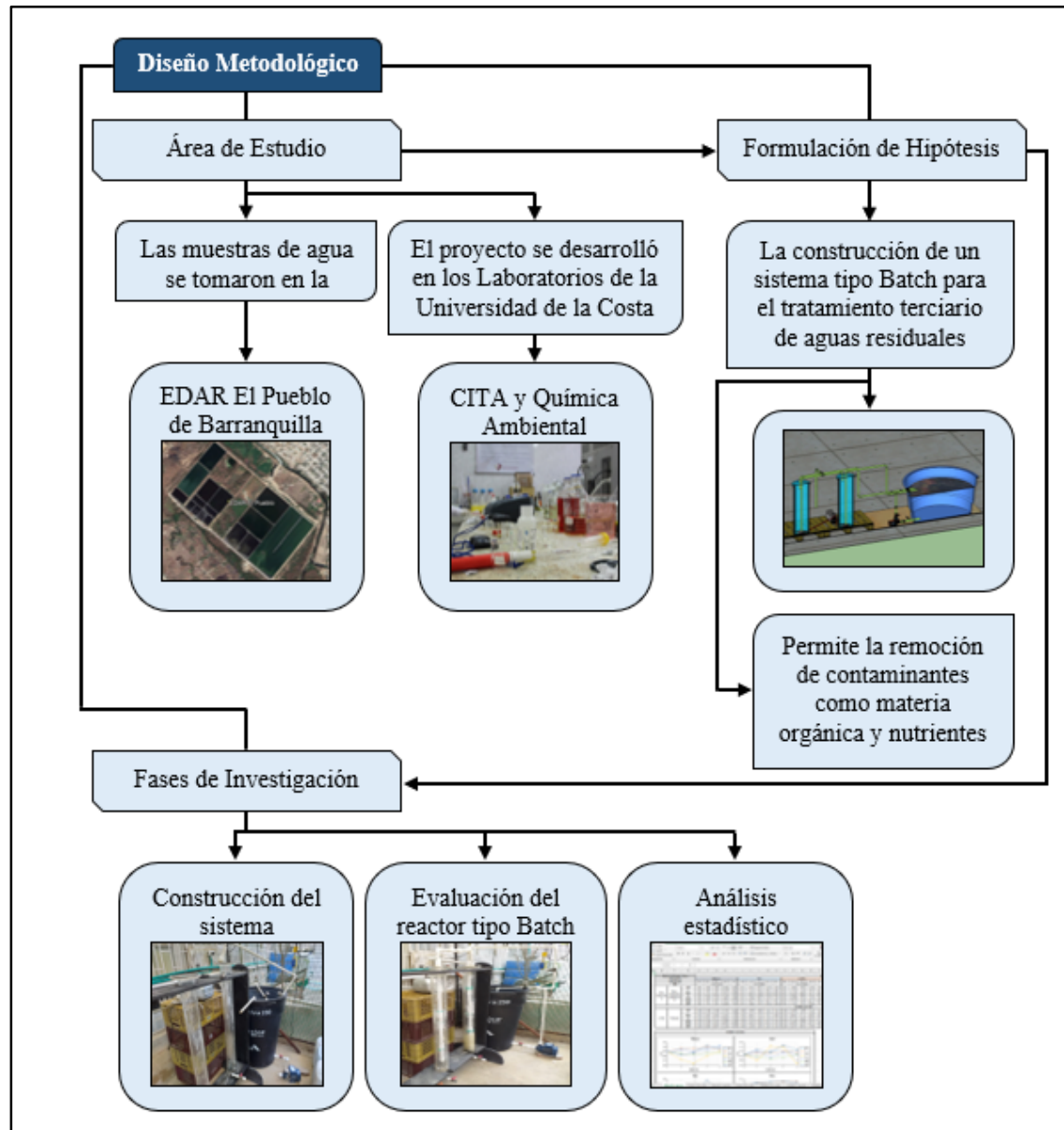


Figura 10. Diseño metodológico. Fuente: Autores.

7.1 Tipo de investigación y alcance

La presente investigación cuenta con un diseño experimental de tipo exploratorio y descriptivo, en la cual se llevaron a cabo una serie de ensayos con el propósito de constituir la viabilidad del sistema propuesto para el tratamiento terciario de aguas residuales municipales, teniendo en cuenta la pocas referencias de dicho proyecto. Para el desarrollo de las investigación se realizó una serie de toma muestras, y así analizar el comportamiento de las variables monitoreadas durante la puesta en marcha del sistema propuesto, teniendo de este modo un enfoque cuantitativo para la obtención de resultados que permitan evaluar el funcionamiento del sistema y la eficiencia de este en el tratamiento de aguas residuales específicamente en la remoción de materia orgánica y nutrientes.

7.2 Área de estudio y toma de muestra

El proyecto de investigación se desarrolló en el Centro de Investigación de Tecnologías Ambientales (CITA) de la Universidad de la Costa ubicada en la ciudad de Barranquilla – Colombia.

Las muestras de agua para el proceso de investigación se tomaron de la Estación depuradora de aguas residuales (EDAR) de Barranquilla, está localizada a 500 metros al noroccidente del barrio el Pueblo y está diseñada para depurar las aguas residuales provenientes del alcantarillado sanitario de 53 barrios del Distrito de Barranquilla (Figura 11), la toma de las muestras de agua se realiza en la salida del proceso. (E.S.P, 2019)

Para la toma de muestras de agua residual se tuvo en cuenta el protocolo presente en la “*Guía para el Monitoreo de Vertimientos, Aguas Superficiales y Subterráneas*”, con un muestreo manual y puntual, a través de recipientes plásticos previamente esterilizados, debidamente

tapados y rotulados, la muestra se mantuvo a temperatura ambiente hasta realizarles los respectivos analisis. (Decreto No. 1076, 2015, art. 2.2.3.3.4.13; IDEAM, 2010).



Figura 11. Estación depuradora de Aguas Residuales. Fuente: Google Earth. (2015).

7.3 Formulación de Hipótesis

El diseño de un sistema de tratamiento terciario de agua residual municipal, a partir de un sistema de reactores tipo batch, permite la remoción de contaminantes que se presentan en dichas aguas, tales como materia orgánica, nutrientes, entre otros. Se tuvo en cuenta las distintas tecnologías de tratamiento terciario de agua, evaluación y selección de la más adecuada desde un punto de vista técnico, económico, ambiental y de seguridad. Los niveles altos de nutrientes presentes en aguas residuales son muy comunes, y tiene como consecuencia en los cuerpos de agua los problemas de eutrofización. Dicho lo anterior, las hipótesis del proyecto son:

Hipótesis nula (H_0): No hay diferencia significativa en las medidas de los parámetros antes y después del tratamiento.

Hipótesis alterna (H_1): Hay diferencia significativa en las medidas de los parámetros antes y después del tratamiento.

7.4 Fases de la investigación

En el presente trabajo de investigación se construyó un reactor tipo Batch a escala piloto para el tratamiento terciario de aguas residuales, el cual se diseñó con el fin de incluir dentro del mismo un sistema de filtración múltiple con material bioadsorbente y microalgas. Teniendo en cuenta lo anterior durante del desarrollo de dicha investigación, se tendrán en cuenta en las 3 fases metodológicas (construcción, evalaucion del funcionamiento y análisis estadístico) 2 escenarios, el sistema de tratamiento simple (STS) y el sistema de filtración múltiple (SFM), con el fin de analizar el comportamiento del reactor en ambas condiciones, siendo el STS simplemente un recirculación del agua residual y el aporte de aireación y por otro lado el SFM la inclusión de material bioadsorbente y microalgas.

7.4.1 Fase 1: Construcción del sistema.

La primera fase del proyecto abarca la construcción del reactor tipo Batch, basado en el diseño establecido por medio del macroproyecto de investigación denominado “Desarrollo de un sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas mediante la implementación de filtración múltiple con material bioadsorbente y microalgas”.

El reactor propuesto, construido a escala piloto para el tratamiento terciario de aguas residuales, consistió en dos biorreactores conectados en serie y acoplados a un tanque de abastecimiento que contaba a su vez con una bomba para la distribución del agua por medio de

tuberías, llaves de control para la regulación del caudal y una bomba para suministrar aireación. Con el propósito de cubrir los objetivos definidos para la implementación del reactor tipo Batch, se consideraron diferentes factores para la construcción y puesta en marcha del mismo, realizando un sistema de tratamiento simple (STS) y un sistema de filtración múltiple (SFM) que incluía la adición de material bioadsorbente y microalgas.

Con respecto al uso de microalgas, fue necesario adoptar ciertos parámetros de diseño que garantizaran las condiciones adecuadas para su actividad dentro del proceso de tratamiento, entre los que se destacan el material de los dos reactores, su diámetro y longitud. Las microalgas son organismos unicelulares eucariotas fotosintéticos (GRUPO, 2019), capaces de captar energía lumínica y transformarla en energía química mediante la fotosíntesis, contribuyendo a su rápido crecimiento (Santos, Gonzales, & Martin, 2014) siendo la intensidad lumínica uno de los principales parámetros a contemplar (Hernandez & Garzon, 2014)

Teniendo en cuenta lo anterior, fue indispensable escoger un material que actuara como receptor de luz y facilitara la captura de la luz solar, por ello se tuvo en cuenta el acrílico que presenta un índice de luz del 92%, lo cual demuestra una calidad superior al vidrio con un índice de luz del 84% (OG, s.f.). De igual forma, el acrílico puede adquirir diferentes formas y no retiene el calor, favoreciendo a las microalgas que requieren unas condiciones de temperatura entre los 28 y 35°C, (Hernandez & Garzon, 2014) en concordancia con diferentes autores que han evidenciado una disminución en el crecimiento de la población con temperaturas menores a los 16°C y la muerte de un gran número de especies con una temperatura superior a los 35°C (J. R, Montañez, C. N, A, & B, 2012)

Otra de las características de los reactores que contribuyó a la entrada de luz para las microalgas fue el diámetro, un parámetro de diseño indispensable al considerar que entre más

grande sea este, la luz no entraría con la misma intensidad a media que se acerca al centro del cilindro. Por lo cual es recomendable que se trabaje con un diámetro igual o menor a 0,1 m, para garantizar que la luz logre cubrir la mayoría del volumen depositado en los biorreactores a medida que la densidad del cultivo aumenta (Velásquez & y Ulate, 2012)

La velocidad del flujo de agua residual garantizaba que las microalgas no se estancaran en un lado del tubo, sin embargo, fue importante tener en cuenta que una turbulencia excesiva podía llegar a dañar las células (Velásquez & y Ulate, 2012), en este caso se analizó la difusión del aire en el proceso y la agitación suficiente para mantener las condiciones de mezcla a pequeña escala.

Para incluir dentro del sistema el material bioadsorbente como parte del proceso de tratamiento del agua residual, se decidió implementar el diseño de un lecho fijo, el cual consiste en un compartimiento principal donde se ubica un lecho filtrante, en este las partículas se encuentran inmovilizadas y por tanto en íntimo contacto unas con otras (Salud, 2005), (IBORRA, TEJERO, & FIDEL, 2013)

En el sistema propuesto el material se ubicó en un tubo de PVC fijo en el centro de los reactores, permitiendo el ingreso del agua por la parte superior del tubo para que se garantizara el contacto directo de esta con el material, actuando como un medio filtrante para la remoción de nutrientes presentes en el agua residual y contando con seis (6) etapas a lo largo del sistema, adquiriendo el termino de filtración múltiple (Salud, 2005).

Cabe resaltar que, el reactor tipo Batch consiste en un sistema intermitente que no cuenta con entradas y salidas, lo que posibilita la adición de reactivos para generar una reacción durante un cierto periodo de tiempo (LEVENSPIEL, 2004)El sistema construido trabajó con las características de un reactor tipo Batch, sin entradas ni salidas y bajo un flujo continuó del agua

residual en el sistema durante un periodo de tiempo estipulado, tomando alícuotas cada ciertos intervalos de tiempo como parte del análisis del proceso de remoción.

Finalmente, se procedió a realizar la construcción del reactor, para lo cual se conectó el tanque de abastecimiento a una bomba de agua que posee un caudal de 40 L/min y 0,5 Hp, encargada de alimentar los reactores por medio de una serie de tuberías de 1/2" de diámetro. Dicha bomba se conectó a un tubo de 1" de diámetro ubicado en la parte interna del primer reactor, dicha tubería contaba con tres (3) divisiones diseñadas con el fin de mantener fijo el material bioadsorbente, en la parte inferior del mismo se colocó un tapón con agujeros para permitir la salida del agua.

El primer reactor tenía en la parte superior una salida de agua por medio de un tubo de 1/2" de diámetro, el cual se comunicaba con un tubo de 1" de diámetro ubicado en la parte interna del segundo reactor, con un esquema similar al anteriormente descrito, el efluente generado en este reactor era dirigido nuevamente hacia el tanque de abastecimiento a través de un tubo de 1/2" de diámetro. En la parte inferior de cada reactor se colocó una (1) piedra dosificadora o piedra porosa, unidas por medio de una manguera plástica hacia una bomba de aireación con un caudal de aire comprendido entre los 80 L/min hasta los 120 L/min.

7.4.2 Fase 2: Prueba del reactor a escala piloto.

Con el fin de evaluar el funcionamiento del sistema construido, se realizó el montaje del agua residual en dos condiciones, sistema de tratamiento simple (STS) y sistema de filtración múltiple (SFM), para ambos caso se realizó la caracterización inicial de la muestra de agua como dato referente posterior a esto se procedía a encender el sistema y dar inicio al tratamiento, para cual se tuvo en cuenta, tiempo de retención y caudal variando para ambas condiciones, sin embargo el volumen se mantuvo igual en los dos.

El análisis del agua se realizó conforme a lo descrito en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23rd Edition, definiendo los códigos respectivos. En la tabla se muestra los parámetros que fueron monitoreados durante la puesta en marcha del sistema de tratamiento, con su respectivo código de método de análisis.

Tabla 3

Parámetros con su respectivo código de análisis

Parámetro	Código	Parámetro	Código
pH	4500-H ⁺	Fosfatos (PO ₄ - mg/L)	4500-P
temperatura (°C),	2550	Fosfatos (PO ₄ - mg/L)	4500-NO ₃ ⁻
Alcalinidad		Nitritos (NO ₂ ⁻ - mg/L)	4500-NO ₂ ⁻
TDS	2540	DBO ₅	5210
OD	4500-O:II	DQO	5220

7.4.2.1 Sistema de tratamiento simple (STS).

Este escenario consistió en hacer tratamiento al agua residual solo con recirculación al sistema y aporte de aireación.

Inicialmente se realizaron 3 pruebas aleatorias con tiempo de retención de 2 horas, en las cuales se tomaron 4 muestras incluyendo la caracterización inicial con el fin de analizar el comportamiento de los parámetros durante las 8 horas en que el sistema estaría en marcha.

7.4.2.2 Sistema de filtración múltiple (SFM).

La puesta en marcha del sistema en este caso incluiría el material bioadsorbente y las microalgas como parte del tratamiento del agua residual, la cual tuvo una corrida de 24 con una frecuencia de muestreo de cada cuatro horas, esto a partir del tiempo de retención necesario teniendo en cuenta.

A partir de la investigación realizada por el proyecto “Evaluación de materiales bioadsorbentes modificados térmicamente en la remoción de nutrientes presentes en aguas residuales municipales de la ciudad de Barranquilla”. Los resultados permitieron identificar que la muestra Rb3, de Roca Coquina con tamaño de 2,36 mm expuesta a una temperatura 400 °C, en una concentración de 8 mg/L, era la más eficiente en la remoción de los parámetros evaluados, en concordancia con diferentes investigaciones que han demostrado la capacidad de remoción de contaminantes, como los metales pesados, de los materiales sinterizados a 400°C (Mopoung, 2014).

El grupo de investigación, el cual realizo el estudio titulado “Eliminación de fosfatos y nitratos de aguas residuales municipales utilizando chlorella sp en un sistema de reactores en continuo”. Con un tamaño de 1 a 10 μ En un sistema de tractores en continuo” proporciono para el sistema una concentración de $4,8 \times 10^6$ cel/ml de microalgas chlorella sp. La sepa fue proporcionada por el centro de investigación de Tecnología ambientales.

7.4.3 Fase 3: Análisis estadístico de remoción de parámetros.

En la última fase del proyecto se tabuló los resultados obtenidos en los muestreos, esto con el fin de analizar específicamente cada uno de los parámetros monitoreados, y así determinar si el reactor proporcionaba las condiciones óptimas para el tratamiento. Debido a que se hicieron dos

monitoreos, con condiciones distintas y en periodos diferentes, se efectuó el análisis de forma individual, determinando cuál de los dos tipos de tratamientos presenta mayor variabilidad. Los datos fueron procesados en el programa estadístico SPSS; el cual fue escogido debido a que ofrecía las mejores condiciones para obtener un análisis correcto de cada una de las muestras. Entre las condiciones del programa SPSS, es ofrecer un formato de hoja de cálculo simple para la entrada de los datos, lo cual ayuda a garantizar la coherencia de estos; además presenta opciones de visualización grafica muy completas, que ayudan a entender mejor el comportamiento de los datos.

Se realizó el cálculo del porcentaje de remoción para el tratamiento con el sistema de tratamiento simple (STS) y con el sistema de filtración múltiple (SFM), con el fin de analizar y constatar con qué tipo de sistema se produce la máxima remoción, para este se tuvo como dato de referencia los valores obtenidos de la caracterización, identificados en las tablas de datos como hora cero (0).

Por último, se efectuaron los análisis de varianza a partir del programa estadístico SPSS, el cual se escogió debido a la capacidad que presenta para trabajar con base de datos de gran tamaño, además de realizar con la prueba de ANOVA, el análisis de más de dos grupos, en nuestro caso los parámetros; dicho análisis se efectuó para los dos tipos de tratamientos o sistemas, con el sistema de tratamiento simple (STS) y con el sistema de filtración múltiple (SFM). Debido a que las pruebas de los dos tipos de sistemas no se realizaron bajo las mismas condiciones, si no de forma separada y con muestras y días diferentes, lo que realmente se buscó a partir del análisis de varianza, es determinar específicamente la variabilidad de cada parámetro antes y después del tratamiento por hora; así mismo, buscamos determinar si el sistema ofrece las condiciones necesarias para realizar los dos tipos de tratamientos, y por último en cuál de los dos

tipos de tratamiento se realiza mayor varianza. Para realizar el análisis de varianza primero se determinó según el tipo de datos, el análisis estadístico que se iba a ejecutar, ante eso, se debió tomar el análisis de varianza - ANOVA, puesto que teníamos una prueba paramétrica con muestras relacionadas, pero con más de dos variables. Se decidió escoger el análisis de varianza ANOVA, (Fernandez, 2016) (Talca, 2010), posteriormente se hicieron las pruebas a los supuestos, debido a que antes de realizar el análisis de varianza se debe cumplir con los supuestos de homogeneidad, normalidad e independencia. Para determinar si los datos cumplen o no con estas pruebas, se efectuó con las opciones con las que cuenta el programa SPSS, luego de realizar las pruebas y verificar que los datos cumplieron con los tres supuestos, se procedió a realizar el análisis de varianza para los dos tipos de sistemas.

8. Resultados y análisis

Conforme a la metodología expuesta, a continuación, se presentan los resultados obtenidos en cada una de las fases desarrolladas.

8.1 Construcción del Sistema de Tratamiento

En la tabla 4 se relacionan los materiales utilizados para la construcción del sistema de tratamiento.

Tabla 4.

Materiales utilizados durante la construcción del reactor tipo Batch

Material	Cantidad	Descripción
Bomba de agua	1	Q = 40 L/min 110 V, 0,37 kw, 0,5 Hp 550 W
Bomba de aire	1	Max air Stone depth 9 pies Max air flow 800 Gpd 120 V 35 watts
Tubería PVC	2 m	1 pulgada
	5 m	½ pulgada
Accesorios	6	Válvulas
	10	Codos
	12	Unión universal
	3	Te
Piedra de aireación	2	
Tanque de almacenamiento	1	Capacidad de 150 L
Pegante de tubería PVC	1	

Nota: Los materiales fueron adquiridos en puntos autorizados y las bombas fueron suministradas por el Laboratorio de CITA de la Universidad de la Costa.

Teniendo en cuenta que se realizaron dos tipos de tratamiento dentro del mismo sistema, a continuación, se muestra de manera individual los resultados finales obtenidos durante la construcción del reactor tipo Batch a escala piloto para ambos sistemas.

8.1.1 Sistema de tratamiento simple (STS).

En la figura 12 se presentan las dimensiones finales establecidas para el reactor tipo Batch, en el cual se obtuvo un reactor con una altura externa de 1 m y un diámetro externo de 7 pulgadas. En la parte interna se encuentra un tubo de 1 pulgada con una altura de 0,94 m, una piedra de aireación conectada por medio de una manguera hacia la parte externa con la bomba de aireación. Cabe destacar que en el segundo montaje se manejaron las características similares.

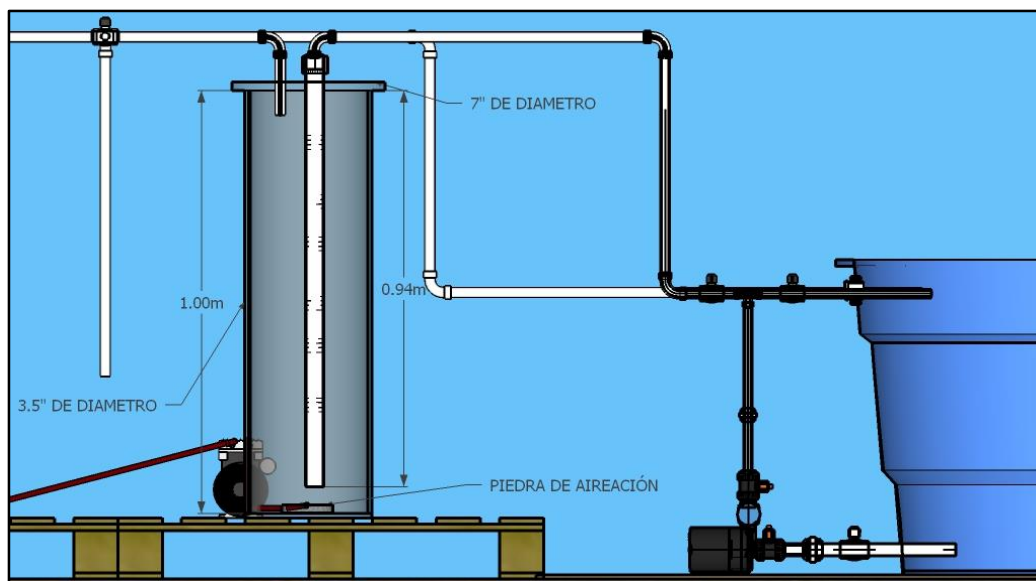


Figura 12. Diseño y dimensiones del reactor tipo Batch. Fuente: Autores.

8.1.2 Sistema de filtración múltiple.

La figura 13 es un corte transversal del reactor, donde se muestra la distribución del material a lo largo del tubo interno, cumpliendo con las características de un lecho fijo, garantizando de esta manera el contacto directo del fluido con el material a lo largo del proceso.

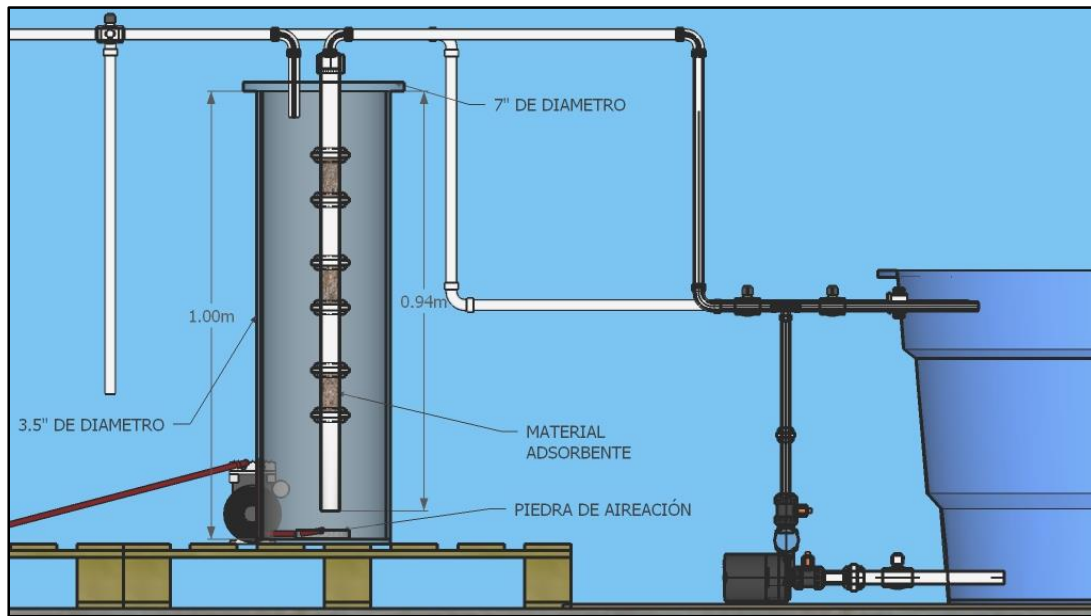


Figura 13. Diseño de los reactores con el material bioadsorbente incorporado. Fuente: Autores.

Como resultado final de la construcción del reactor se tiene un tanque de abastecimiento con capacidad de 150 litros, el cual se encuentra conectado a una bomba de agua (ver tabla 4) para la circulación de la misma por medio de las tuberías de PVC de media pulgada, los dos reactores presentaban a su vez un sistema de aireación suministrado por una bomba (ver tabla 4) conectada a dos piedras porosas para garantizar una mejor distribución del aire (ver figura 14).

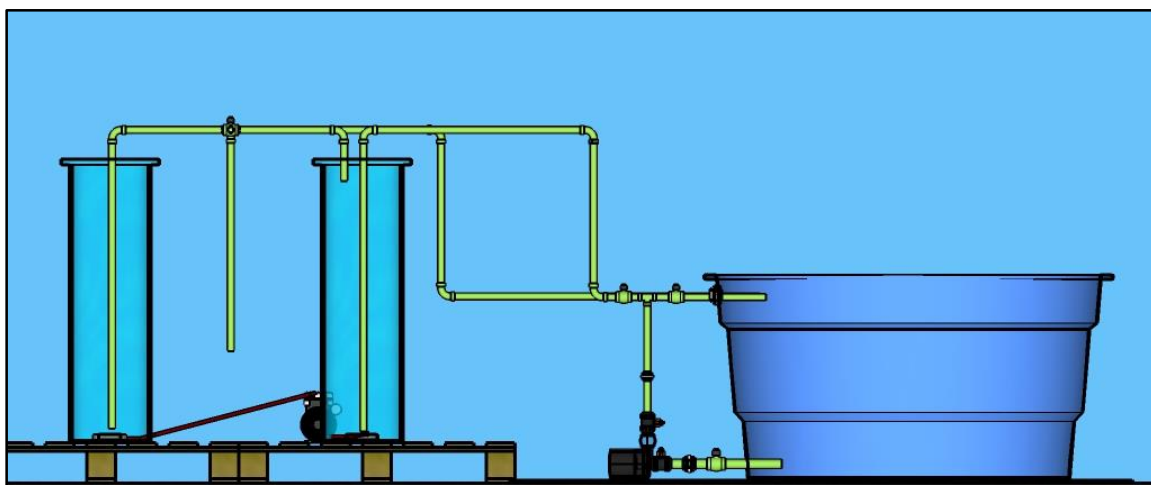


Figura 14. Resultado final del sistema de tratamiento. Fuente: Autores.

Las figuras 15 y 16 representan la fase inicial y final de la construcción del reactor a escala piloto, en la primera se observa la disposición de los dos reactores conectados al tanque de abastecimiento mediante la bomba de agua y en la segunda se encuentra el sistema armado y en funcionamiento para realizar las pruebas hidráulicas y el análisis de los parámetros establecidos.



Figura 15. Sistema de tratamiento construido, reactor tipo Batch. Fuente: Autores.



Figura 16. Resultado final del reactor construido y en funcionamiento con el agua residual municipal. Fuente: Autores.

8.2 Pruebas del reactor tipo Batch a escala piloto

Se depositaron 40 L de agua residual en el tanque de abastecimiento, la cual fue bombeada hacia los reactores por medio de las tuberías de 1/2", al llegar al primer reactor el agua ingresaba por la parte superior hacia el tubo de 1" y se desplazaba de manera descendiente, al salir del tubo se llenaba el reactor y una vez alcanzado su volumen el agua se conducía de forma inmediata al segundo reactor, siguiendo el mismo proceso del anterior, del cual se transportaba el agua residual nuevamente al tanque de abastecimiento. La bomba de aireación conectada en la parte inferior hacia las piedras dosificadoras se encendió de manera inmediata, con el fin de que el proceso se realizara de manera completa de principio a fin.

Para presentar los resultados obtenidos durante las pruebas realizadas al reactor, se definieron los siguientes puntos.

8.2.1 Tiempo de retención, caudal y volumen.

8.2.1.1 Tiempo de retención.

Para ello se tomó los resultados obtenidos en la evaluación del sistema en tres días diferentes, en el anexo 1 se encuentran los datos de los análisis de los 11 parámetros evaluados organizados por días, cabe resaltar que para hacer las gráficas solo se tuvo en cuenta materia organica (DBO5, DQO) y nutrientes (nitrato, nitrito y fosfato), por ser los parámetros referentes. Dicho lo anterior, en la ilustración 17, se exponen las gráficas que representan el comportamiento de cada uno de estos parámetros en un periodo de tiempo de 8 horas con tomas de alícuotas cada 2 horas.

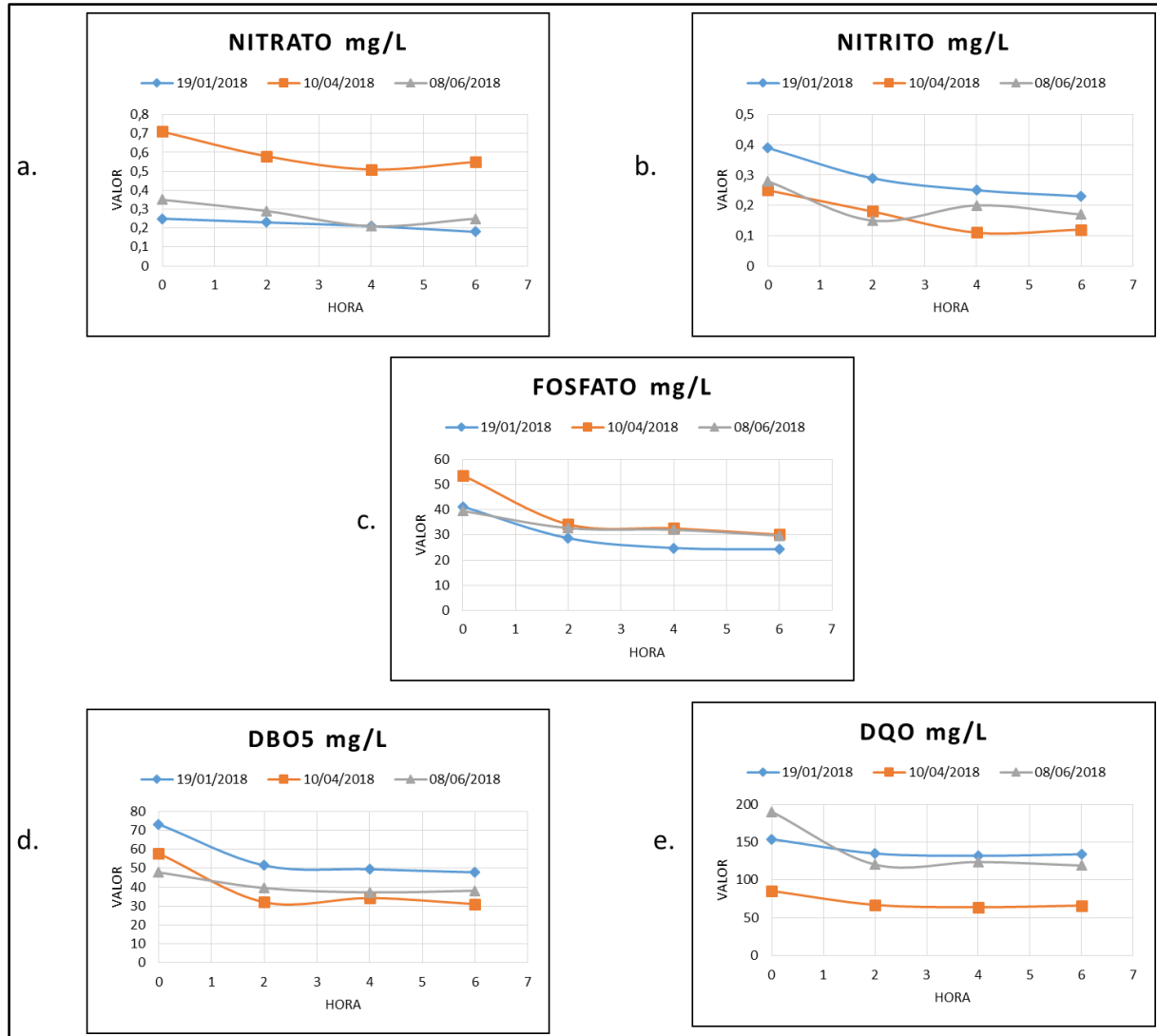


Figura 17. Determinación del tiempo de retención mediante el monitoreo de Nitratos (a), nitritos (b), fosfatos (c), DBO5 (d), DQO (e). Fuente: Autores.

El caudal fue calculado teniendo en cuenta el tiempo de retención anteriormente obtenido y el volumen de agua tratada, utilizando la ecuación 1, donde Q es caudal, V es el volumen y t es el tiempo.

$$Q = \frac{V}{t} \quad (1)$$

Al reemplazar los valores ya conocidos, volumen de 40 L y tiempo de 2 h, se obtiene un caudal de:

$$Q = \frac{40 \text{ L}}{2 \text{ h}} = \boxed{20 \text{ L/h} \rightarrow 0.005 \text{ L/s}}$$

Por lo anterior se evidencia un caudal teórico de 0.005 L/s para el sistema de tratamiento.

Se realizó el cálculo del caudal de manera experimental, para realizar esto se dividió el caudal original con el que era bombeado por la motobomba (40 L/min), debido a que este caudal no permitía cumplir con el tiempo de retención necesario para el tratamiento y funcionamiento óptimo del sistema. Es preciso mencionar que se tuvo un sistema de recirculación, el cual permitía el transporte del agua que provenía de los dos reactores al tanque de almacenamiento, para ingresar nuevamente al proceso de tratamiento. Al dividir el caudal se tiene un valor de 20 L/min (0,3 L/s).

8.2.2 Sistema de tratamiento simple (STS).

Teniendo en cuenta el punto anterior donde se determinó el tiempo de retención, el volumen y el caudal, para el sistema de tratamiento simple se realizaron pruebas durante 8 horas, con tomas de alícuotas cada 2, en el anexo 2 se muestran los resultados obtenidos. Para este caso a la cuarta hora de tratamiento se le retiró 20 litros de la muestra y de inmediato se le vertió la misma cantidad de agua nueva (sin tratamiento), con el fin de analizar el comportamiento como si fuese un nuevo inicio del proceso.

8.2.3 Sistema de filtración múltiple (SFM).

Para el sistema de filtración múltiple se realizaron pruebas durante 24 horas con tomas de alícuota cada 4 horas, teniendo así un total de 8 datos (ver anexo 3). Teniendo en cuenta que las

microalgas tienen velocidad de remoción más lento, en este tratamiento se tomaron las alícuotas cada 4 horas, ya que en este tiempo comienzan a mostrar los primeros comportamientos de remoción.

Partiendo de que el material más efectivo fue la Roca Coralina con un tamaño de 2,36 mm y una cantidad de 2,4 g., para el tratamiento en el reactor para el cual se trabajó con 45 l de agua residual, se utilizaron 350 g de material repartido en los 2 tubos internos en 3 compartimientos con una cantidad de 58.3 cada uno, teniendo para cada reactor 125 g de material, por otro lado se utilizaron 12 l de microalgas a una concentración de 11×10^6 y al agregarla directamente al tanque de abastecimiento con 45 l de agua residual quedo en una concentración de $4,8 \times 10^6$ cel/mL.

8.3 Análisis estadístico de remoción de parámetros

8.3.1 Porcentaje de remoción.

Para determinar el porcentaje de remoción en el sistema de tratamiento se utilizó la ecuación 2, para ello se tuvo en cuenta los resultados obtenidos en los sistemas de tratamiento en los que se trabajaron, el sistema de tratamiento simple (STS) y el sistema de filtración múltiple (SFM).

$$\text{Remoción (\%)} = \frac{\text{Afluente} - \text{Efluente}}{\text{Afluente}} \quad (2)$$

Siendo el afluente el agua que entra al sistema en la hora cero (0), sin tratamiento, y el efluente la alícuota tomada cada 2 y 4 horas, para el STS y el SFM respectivamente.

Para el tratamiento de aguas residuales con el sistema de tratamiento simple (STS), se realizó el cálculo del porcentaje de remoción para dicho tratamiento, para lo cual se encontró que en algunos parámetros se evidencio mayor remoción que en otros.

En la ilustración 18 se evidencia la gráfica en la cual se observa a partir de los valores de remoción, dicha grafica evidencia que el parámetro con mayor remoción fue la DQO y el de menor remoción la alcalinidad. Es importante precisar que un factor que influye en el análisis es que a la cuarta hora se le agrego un porcentaje de agua nueva sin tratar, lo que lleva a producirse altos valores de remoción con respecto al inicial.

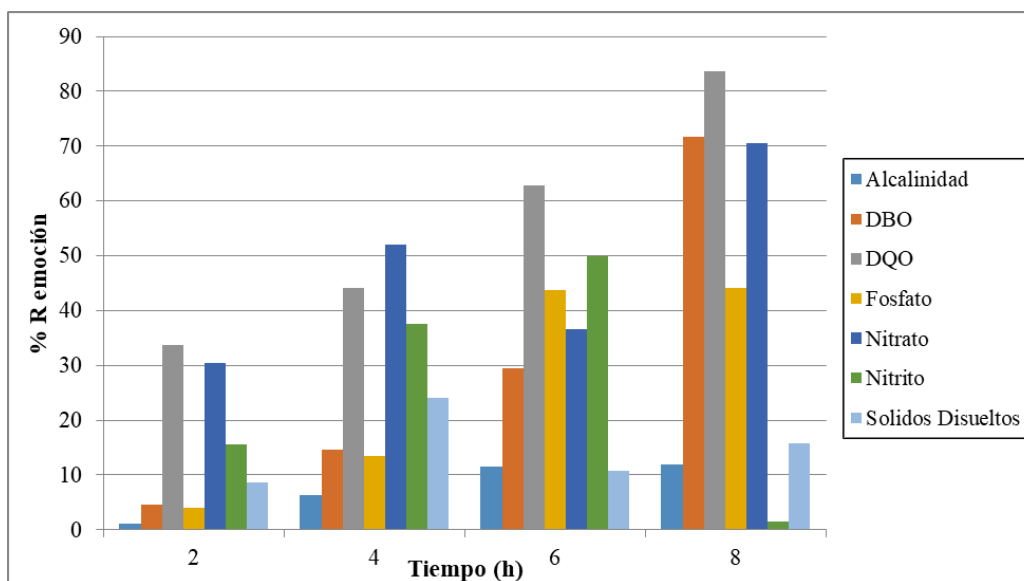


Figura 18. Porcentajes de remoción de los parámetros evaluados en el sistema de tratamiento simple (STS). Fuente: Autores.

Para el tratamiento de aguas residuales con el sistema de filtración múltiple (SFM), se realizó el cálculo del porcentaje de remoción para dicho tratamiento, para lo cual se encontró que en algunos parámetros se evidencio mayor remoción que en otros.

En la ilustración 19 se evidencia los valores de remoción para cada uno de los parámetros, siendo el de mayor remoción fue el nitrito, y el de menor remoción el DQO, lo que permite evidenciar y constatar que se cumple el objetivo principal del macro proyectó que es la remoción de nutrientes.

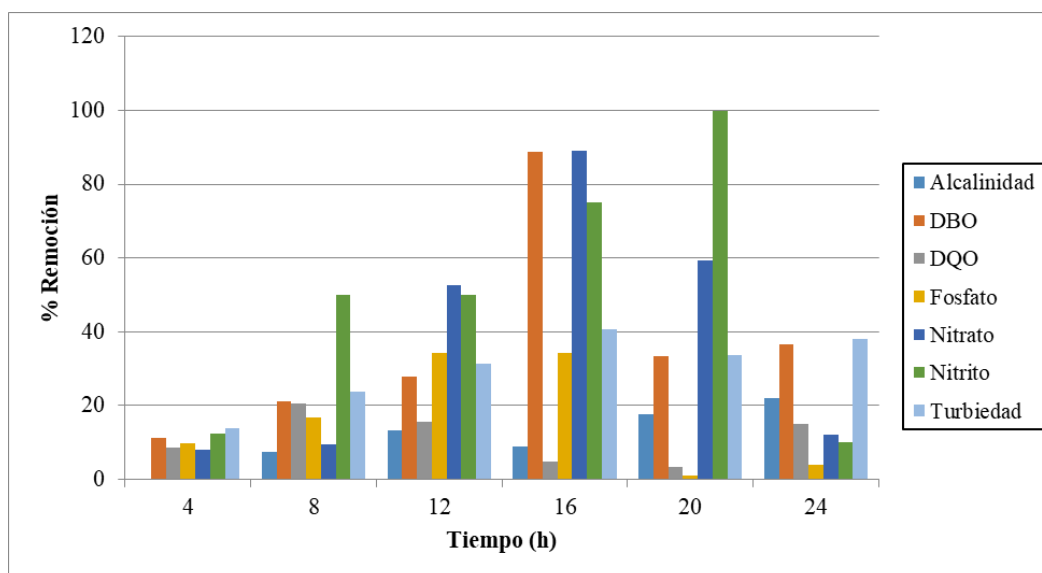


Figura 19. Porcentajes de remoción de los parámetros evaluados en el sistema de filtración múltiple (SFM). Fuente: Autores.

Se puede inferir que ambos tratamientos muestran resultados favorables en cuanto a su remoción, siendo este más eficiente en unos parámetros que en otros. Así mismo, se denota que el tratamiento con microalgas y material bioadsorbente presenta mayor y mejor comportamiento que el reactor en condiciones normales.

8.3.2 Análisis de varianza.

8.3.2.1 Análisis de varianza del reactor en el sistema de tratamiento simple (STS) con programa SPSS.

Para realizar el análisis de varianza se realizaron pruebas que permitieron probar o no, la hipótesis que formulamos en la investigación en curso (Dagnino, 2014; González, 2009). Por lo tanto, se realizó la formulación de la hipótesis, la cual se divide en hipótesis nula (H_0) e hipótesis alterna (H_1); en relación a lo anterior, las hipótesis son las siguientes:

Hipótesis nula (H_0): No hay diferencia significativa en las medidas de los parámetros antes y después del tratamiento.

Hipótesis alterna (H_1): Hay diferencia significativa en las medidas de los parámetros antes y después del tratamiento.

También se debió definir el nivel alfa, que sería el porcentaje de error que estamos dispuestos a correr al realizar la prueba. En este caso el porcentaje es del 5% en nivel numérico 0,05; es decir, $\alpha = 0,05$.

Se escogió el tipo de prueba con la cual realizaremos el análisis de varianza en el programa estadístico SPSS, entonces, debido a que se tuvo una prueba paramétrica y con muestras relacionadas, pero con más de dos variables se precisó seleccionar la prueba de ANOVA.

Antes de realizar la prueba de varianza ANOVA, se debió hacer unas pruebas para verificar los supuestos, debe cumplir los supuestos de Homogeneidad, normalidad y aleatoriedad.

La primera prueba por realizar es la prueba de normalidad, la cual se realizó con el programa SPSS, en la opción analizar- prueba de normalidad. De acuerdo a lo anterior en la tabla 6 se evidencia que el procesamiento de los datos tiene un porcentaje alto, ya que el 100% de los datos son válidos.

Tabla 5

Resumen del procesamiento de datos para el análisis estadístico

		Casos					
		Valido		Perdidos		Total	
	Parámetro	N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
Entrada del sistema	DBO	4	100,0%	0	0,0%	4	100,0%
	DQO	4	100,0%	0	0,0%	4	100,0%

Salida del sistema	nitrito	4	100,0%	0	0,0%	4	100,0%
	nitrato	4	100,0%	0	0,0%	4	100,0%
	fosforo	4	100,0%	0	0,0%	4	100,0%
	DBO	4	100,0%	0	0,0%	4	100,0%
	DQO	4	100,0%	0	0,0%	4	100,0%
	nitrito	4	100,0%	0	0,0%	4	100,0%
	nitrato	4	100,0%	0	0,0%	4	100,0%
	fosforo	4	100,0%	0	0,0%	4	100,0%

Fuente: Autores.

Por otro lado, en la tabla 7 nos muestra el resumen de los valores para determinar si se acepta o no la prueba de normalidad.

Tabla 6

Resumen de prueba de normalidad. Corrección de significación de liliefors

	PARAMETRO	Kolmogorov-Smirnov^a			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
entrada del sistema	DBO	,302	3	.	,910	3	,419
	DQO	,199	3	.	,995	3	,864
	nitrito	,301	3	.	,912	3	,424
	nitrato	,253	3	.	,964	3	,637
	fosfato	,270	3	.	,948	3	,562
salida del sistema	DBO	,218	3	.	,987	3	,786
	DQO	,241	3	.	,973	3	,688
	nitrito	,289	3	.	,928	3	,480
	nitrato	,188	3	.	,998	3	,913
	fosfato	,268	3	.	,950	3	,570

Fuente: Autores.

Para determinar la normalidad a partir de dos pruebas, la de kolmogorov y la de shapiro, estas pruebas se escogen dependiendo del tamaño de la muestra, para muestras mayores a 30 individuos se escoge Kolmogorov y menores a 30 individuos Shapiro. En este caso se escogió la

prueba de Shapiro, en donde se analizò el número de significancia (Dagnino, 2014). La regla para normalidad es la siguiente:

Si $P\text{-valor} \Rightarrow \alpha \rightarrow$ los datos provienen de una distribución normal.

Si $P\text{-valor} < \alpha \rightarrow$ los datos no provienen de una distribución normal.

Respecto a lo anterior, La prueba Shapiro-Wilk indica que se cumple el supuesto de normalidad. (Estadísticos entre 0,480 y 0,913; gl: 3; $p > 0,05$).

El supuesto de aleatoriedad se realiza a través de la prueba de rachas, dicha prueba se realizó con el programa estadístico SPSS, la regla para cumplirse el supuesto de aleatoriedad es:

$P\text{-valor} \Rightarrow \alpha \rightarrow$ los datos provienen de una distribución aleatoriedad.

$P\text{-valor} < \alpha \rightarrow$ los datos no provienen de una distribución aleatoriedad.

Tabla 7

Prueba de racha

	Prueba de rachas	
	Entrada del sistema	Salida del sistema
Valor de prueba ^a	10,20	7,40
Casos < Valor de prueba	7	7
Casos \geq Valor de prueba	8	8
Casos totales	15	15
Número de rachas	5	6
Z	-1,597	-1,059
Sig. asintótica (bilateral)	,110	,290

Fuente: Autores.

De acuerdo a lo anterior podemos concluir, la aleatoriedad de varianzas de los datos cumple con la regla ($0,110$ y $0,290 > 0,05$), por lo cual los datos cumplen con la segunda prueba de aleatoriedad.

El último supuesto es el de homogeneidad, el cual es el que nos indicó cómo se debió analizar la varianza ANOVA; es decir, si los datos son homogéneos se debe hacer comparaciones múltiples con HSD Tukey y si no son homogéneos Games – Howell. Por lo tanto, la regla para homogeneidad es (Dagnino, 2014).

Si P-valor $\Rightarrow \alpha \rightarrow$ los datos provienen de una distribución homogénea.

Si P-valor $< \alpha \rightarrow$ los datos no provienen de una distribución homogénea.

Tabla 8

Prueba de homogeneidad de varianza

	ESTADISTICO DE LEVENE	df1	df2	Sig.
ENTRADA DEL SISTEMA	3,722	4	10	0,52
SALIDA DEL SISTEMA	4,436	4	10	,076

Fuente: Autores.

De acuerdo a lo anterior se pudo concluir, las homogeneidades de varianzas de los datos cumplen con la regla ($0,052$ y $0,076 > 0,05$), por lo cual se debe realizar las comparaciones múltiples con HSD Tukey.

Ya habiendo realizado cada una de las pruebas, se realizó el análisis de varianza ANOVA, los resultados se muestran en la tabla 10 El cual nos permitió decir que si cumple el nivel de significancia menor a $0,05$ esta afirma la hipótesis alterna.

Tabla 9*Análisis de varianza ANOVA*

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
	Entre grupos	59867,860	4	14966,965	178,628	,000
Entrada del sistema	Dentro de grupos	837,886	10	83,789		
	Total	60705,746	14			
	Entre grupos	50760,137	4	12690,034	40,698	,000
Entrada del sistema	Dentro de grupos	3118,064	10	311,806		
	Total	53878,202	14			

Fuente: Autores.

Teniendo dichos resultados se concluye que cumple la hipótesis alterna, ya que el nivel de significancia en el análisis de varianza ANOVA es menor a 0,05 ($0,00 < 0,05$) tanto para la entrada del sistema como para la salida del sistema, lo cual nos indica que hay una diferencia significativa en las medidas de los parámetros en la salida del sistema.

P – valor ($0,00 < (\alpha = 0,05)$)

En el anexo 4 del presente trabajo se encuentra la tabla de comparaciones múltiples, la cual nos muestra el análisis individual de los datos, sabiendo que hay homogeneidad de datos, por lo cual aquellos parámetros que estén por debajo de 0,05 es donde se presentó mayor varianza.

Al hacer una comparación de las medias para los datos de salida del sistema, evidenciados en la Tabla 11, en relación con los datos de entrada, Tabla 12, se puede evidenciar que hay una diferencia significativa entre ambos datos, lo que nos indica que hay varianza y por lo tanto remoción en el sistema.

Tabla 10*Medias de datos homogéneos en la entrada del sistema*

	Parámetro	N	Subconjunto para alfa=0.05		
			1	2	3
HSD Tukey^a	nitrito	3	,6167		
	nitrato	3	3,0133		
	DBO	3		44,7667	
	fosfato	3		35,8690	
	DQO	3			129,7200
	Sig.		,997	,113	1,000

Tabla 11 *Medias de datos homogéneos en la salida del sistema*

	Parámetro	N	Subconjunto para alfa=0.05		
			1	2	3
HSD Tukey^a	nitrito	3	,4500		
	nitrato	3	1,8500		
	DBO	3		41,6500	
	fosfato	3		55,0667	55,0667
	DQO	3			78,4000
	Sig.		1,000	,661	1,000

Fuente: Autores.

8.3.2.2 Análisis de varianza del reactor en el sistema de filtración múltiple (SFM) con programa SPSS.

Para realizar el análisis de varianza en este tipo de tratamiento se deben realizar las mismas pruebas que se realizaron en el tratamiento anterior, dichas pruebas que permitan probar o no, la hipótesis que formulamos en la investigación en curso. Por lo tanto, se realizó la formulación de la hipótesis, la cual se divide en hipótesis nula (H_0) e hipótesis alterna (H_1); en relación a lo anterior, las hipótesis son las siguientes:

Hipótesis nula (H_0): No hay diferencia significativa en las medidas de los parámetros antes y después del tratamiento.

Hipótesis alterna (H1): Hay diferencia significativa en las medidas de los parámetros antes y después del tratamiento.

También se debe definir el nivel alfa, que sería el porcentaje de error que estamos dispuestos a correr al realizar la prueba. En este caso el porcentaje es del 5% en nivel numérico 0,05; es decir, $\alpha = 0,05$.

Se escogió el tipo de prueba con la cual realizaremos el análisis de varianza en el programa estadístico SPSS, entonces, debido a que tenemos una prueba paramétrica y con muestras relacionadas, pero con más de dos variables es preciso seleccionar la prueba de ANOVA.

Antes de realizar la prueba de varianza ANOVA, se deben hacer unas pruebas para verificar los supuestos, debe cumplir los supuestos de Homogeneidad, normalidad y aleatoriedad.

Como primera parte se realiza la prueba de normalidad, la cual se realizó con el programa SPSS, en la opción analizar- prueba de normalidad. De acuerdo a lo anterior en la Tabla 13 se evidencia que el procesamiento de los datos tiene un porcentaje alto, ya que el 100% de los datos son válidos.

Tabla 12

Resumen de procesamiento de datos

		casos					
		valido		Perdidos		Total	
	Parámetro	n	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
Entrada del sistema	DBO	6	100,0%	0	0,0%	6	100,0%
	DQO	6	100,0%	0	0,0%	6	100,0%
	Fosfato	6	100,0%	0	0,0%	6	100,0%
	Nitrato	6	100,0%	0	0,0%	6	100,0%
	Nitrito	6	100,0%	0	0,0%	6	100,0%

Salida del sistema	DBO	6	100,0%	0	0,0%	6	100,0%
	DQO	6	100,0%	0	0,0%	6	100,0%
	Fosfato	6	100,0%	0	0,0%	6	100,0%
	Nitrato	6	100,0%	0	0,0%	6	100,0%
	Nitrito	6	100,0%	0	0,0%	6	100,0%

Fuente: Autores.

La tabla 14 nos muestra el resumen de los valores para determinar si se acepta o no la prueba de normalidad. Para determinar la normalidad se puede a partir de dos pruebas, la de kolmogorov y la de shapiro, estas pruebas se escogen dependiendo del tamaño de la muestra, para muestras mayores a 30 individuos se escoge Kolmogorov y menores a 30 individuos Shapiro.

Tabla 13

Resumen de prueba de normalidad

		Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Parámetro	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Entrada del sistema	DBO	,238	3	.	,976	3	,701
	DQO	,282	3	.	,936	3	,510
	Fosfato	,351	3	.	,828	3	,583
	Nitrato	,275	3	.	,944	3	,542
	Nitrito	,175	3	.	1,000	3	1,000
Salida del sistema	DBO	,308	3	.	,902	3	,691
	DQO	,263	3	.	,955	3	,593
	Fosfato	,385	3	.	,750	3	,741
	Nitrato	,215	3	.	,989	3	,800
	Nitrito	,219	3	.	,987	3	,780

Fuente: Autores.

En nuestro caso escogemos la prueba de Shapiro, en donde analizamos el número de significancia. La regla para normalidad es la siguiente:

P-valor $\Rightarrow \alpha \rightarrow$ los datos provienen de una distribución normal.

$P\text{-valor} < \alpha \rightarrow$ los datos no provienen de una distribución normal.

Respecto a lo anterior, La prueba Shapiro-Wilk indica que se cumple el supuesto de normalidad. (Estadísticos entre 0,510 y 1,000; gl: 3; $p > 0,05$).

El supuesto de aleatoriedad se realiza a través de la prueba de rachas, dicha prueba se realizó con el programa estadístico SPSS, la regla para cumplirse el supuesto de aleatoriedad es:

$P\text{-valor} \Rightarrow \alpha \rightarrow$ los datos provienen de una distribución aleatoriedad.

$P\text{-valor} < \alpha \rightarrow$ los datos no provienen de una distribución aleatoriedad.

Tabla 14

Pruebas de rachas

	Prueba de rachas	
	Entrada del sistema	Salida del sistema
Valor de prueba ^a	46,95	39,10
Casos < Valor de prueba	7	7
Casos \geq Valor de prueba	8	8
Casos totales	15	15
Número de rachas	5	5
Z	-1,597	-1,597
Sig. asintótica (bilateral)	,110	,110

Fuente: Autores.

De acuerdo a lo anterior, la aleatoriedad de varianzas de los datos cumple con la regla (0,110 y $0,110 > 0,05$), por lo cual los datos cumplen con la segunda prueba de aleatoriedad.

El último supuesto es el de homogeneidad, el cual es el que nos indica cómo debemos analizar la varianza ANOVA; es decir, si los datos son homogéneos se debe hacer comparaciones múltiples con HSD Tukey y si no son homogéneos Games – Howell. Por lo tanto, la regla para homogeneidad es:

P-valor $\Rightarrow \alpha \rightarrow$ los datos provienen de una distribución homogénea.

P-valor $< \alpha \rightarrow$ los datos no provienen de una distribución homogénea.

Teniendo en cuenta los resultados que se aprecian en la Tabla 16, las homogeneidades de varianzas de los datos cumplen con la regla ($0,077$ y $0,093 > 0,05$), por lo cual se debe realizar las comparaciones múltiples con HSD Tukey.

Tabla 15

Prueba de homogeneidad de varianzas

	Estadístico de Levene	df1	df2	Sig.
Entrada del sistema	4,343	4	10	,077
Salida del sistema	8,177	4	10	,093

Ya habiendo realizado cada una de las pruebas, se realiza el análisis de varianza ANOVA (Tabla 17), el cual nos permite saber si cumple o no el nivel de significancia menor a 0,05 afirma la hipótesis alterna.

Tabla 16 *Análisis de varianza ANOVA*

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entrada del sistema	Entre grupos	59867,860	4	14966,965	178,628	,000
	Dentro de grupos	837,886	10	83,789		

	Total	60705,746	14			
Salida del sistema	Entre grupos	50760,137	4	12690,034	40,698	,000
	Dentro de grupos	3118,064	10	311,806		
	Total	53878,202	14			

Fuente: Autores.

De lo que se logra concluir que se cumple la hipótesis alterna, ya que el nivel de significancia en el análisis de varianza ANOVA es menor a 0,05 ($0,00 < 0,05$) tanto para la entrada del sistema como para la salida del sistema, lo cual nos dice que hay una diferencia significativa en las medidas de los parámetros en la salida del sistema.

P – valor ($0,00 < (\alpha = 0,05)$)

En el anexo 3 del presente trabajo se encuentra la tabla de comparaciones múltiples, la cual nos muestra el análisis individual de los datos, sabiendo que hay homogeneidad de datos, por lo cual aquellos parámetros que estén por debajo de 0,05 es donde se presentó mayor varianza.

Al hacer una comparación entre los datos de la Tablas 18 y 18, siendo estos los de entrada y salida respectivamente, se puede evidenciar que hay una diferencia significativa entre ambos datos, lo que nos indica que hay varianza y por lo tanto remoción en el sistema.

Tabla 17

Medias de datos homogéneos en la entrada del sistema

HSD Tukey^a	PARAMETROS	N	Subconjunto para alfa = 0.05		
			1	2	3
	Nitrito	3	4,0000		
	Nitrato	3	5,9667		
	Fosfato	3	9,7000		
	DBO	3		73,6333	
	DQO	3			167,2200
	Sig.		,936	1,000	1,000

Tabla 18 Medias de datos homogéneos en la salida del sistema

HSD Tukey ^a	PARAMETROS	N	Subconjunto para alfa = 0.05		
			1	2	3
	Nitrito	3	2,1667		
	Nitrato	3	3,9000		
	Fosfato	3	7,5333	7,5333	
	DBO	3		51,6667	
	DQO	3			154,3333
	Sig.		,995	,071	1,000

Fuente: Autores.

De manera general, se puede decir que el sistema del reactor en condiciones normales ofrece una varianza y una remoción para cada uno de los parámetros evaluados, por lo tanto, este se presenta como un tipo de tratamiento ideal para funcionar en diversos tipos de industrias para el tratamiento de sus aguas residuales. Así mismo, el funcionamiento del reactor con ayuda de las microalgas y el material filtrante incrementa su porcentaje de remoción, pero aumenta su tiempo de retención, por lo que se traduce en un sistema de tratamiento confiable, pero al cual se le deben realizar modificaciones y mejoras con el fin de disminuir el tiempo de retención. Es importante decir que este sistema es capaz de tratar aguas no domésticas, puesto que el agua con la cual se realizaron las pruebas proviene de la PTAR del pueblito, a la cual llegan vertimientos tanto domésticos como no domésticos. Es significativo mencionar que el análisis satisfactorio que ofrece el porcentaje de remoción es sustentado y amparado por el análisis de varianza que se realizó con el programa estadístico SPSS, por lo que ha habido una concordancia con los análisis y los resultados de estos.

9. Conclusiones

Se realizó un sistema de reactores tipo Batch a escala piloto, con el propósito de hacer un tratamiento terciario del agua residual municipal proveniente de la EDAR El pueblo ubicada en la ciudad de Barranquilla. Para verificar el tratamiento se realizaron pruebas en los dos tipos de sistemas planteados, sistema de tratamiento simple (STS) y sistema de filtración múltiple (SFM).

La primera etapa del proyecto se basó en la construcción y puesta en marcha del sistema de tratamiento, teniendo en cuenta estudios y proyectos similares, y como referencia primordial las condiciones que debían ofrecerse a cada uno de los componentes del sistema. Por lo anterior, fue necesario adoptar ciertos parámetros de diseño que garantizaran las condiciones adecuadas para el proceso de tratamiento, entre los que se destacan el material de los dos reactores, su diámetro y longitud. De acuerdo a esto, fue indispensable escoger un material que facilitara la captura de la luz solar, por ello se tuvo en cuenta el acrílico que presenta un índice de luz del 92%, con un diámetro igual o menor a 0,1 m para garantizar que la luz cubriera la totalidad del volumen del reactor.

Otra condición determinante fue la implementación de un lecho fijo para depositar el material bioadsorbente, por lo que se ubicó un tubo de PVC fijo en el centro de los dos reactores, permitiendo el ingreso del agua por la parte superior de estos para que se garantizara el contacto directo de esta con el material, actuando como un medio filtrante para la remoción de nutrientes presentes en el agua residual y contando con seis (6) etapas o divisiones a lo largo del sistema. Las muestras de agua fueron tomadas en la salida del sistema de tratamiento; como parte preliminar se realizaron pruebas en el sistema con el fin de determinar el diseño hidráulico necesario para ofrecer un funcionamiento óptimo del mismo. Se realizaron tres corridas durante 24 horas para determinar el tiempo de retención, al comparar dichas corridas se evidencio que el

tiempo de retención hidráulico para el sistema de tratamiento simple (STS), en el cual se originaba la mayor remoción para los parámetros evaluados, fue de 2 horas, con un volumen de 40 L de agua residual municipal, a partir de esto se determinó el caudal teórico y práctico del proceso, con valores de 0,005 L/s y 0,3 L/s respectivamente.

Para los dos tipos de sistemas, tratamiento simple y de filtración múltiple, se monitorearon los parámetros de control (alcalinidad, pH, oxígeno disuelto, entre otros) y los nutrientes por medio de los cuales se buscaba determinar el porcentaje de remoción (DBO, DQO, fosfatos, nitratos y nitritos). Para el caso del sistema de tratamiento simple (STS), se evidencio mayor remoción en el parámetro de DQO con un 83,7% y menor porcentaje de remoción en la alcalinidad con un 1,04%.

En comparación al sistema anteriormente mencionado, el sistema de filtración múltiple (SFM) ofrece mayor remoción de parámetros como los nutrientes, debido a que en este se evidenció un porcentaje del 100% para el caso de los nitritos y mostrando una menor remoción en la alcalinidad con un porcentaje del 0%, lo cual se explica ante la presencia de carbonato de calcio (CaCO_3) en el material adsorbente implementado, roca coquina. Los resultados permiten concluir que el sistema terciario de tratamiento realizado logra remover los nutrientes que no son removidos con eficiencia en los sistemas convencionales utilizados en la ciudad de Barranquilla.

De igual forma se realizó un análisis de varianza a los dos sistemas evaluados, de manera independiente, debido a que no se podía cotejar un sistema con el otro, por no contar con las mismas condiciones de trabajo. Por medio del análisis de varianza se planteó determinar si sus medidas poblacionales, en este caso los parámetros, difieren o no entre sí, identificando la relación en la capacidad de remoción entre los contaminantes monitoreados, y cuál de estos es el que presenta mayor remoción en cada uno de los sistemas propuestos.

Se realizaron las pruebas de los tres supuestos o pruebas necesarias a los datos para poder realizar el análisis de varianza (normalidad, aleatoriedad y homogeneidad), los cuales cumplieron con lo requerido a nivel teórico, logrando identificar mediante el análisis estadístico de varianza ANOVA que había una varianza entre los datos de entrada y salida del sistema. Lo anterior permitió inferir que, la hipótesis alterna que planteaba una diferencia entre los datos de entrada y salida del sistema es correcta, cumpliendo con esto los objetivos trazados en nuestro proyecto. Es importante precisar que el análisis de varianza se realizó como complemento de la investigación, debido a que se buscaba llevar a cabo un análisis estadístico suficiente que permitiera ofrecer un sistema adecuado para cada tipo de tratamiento.

Finalmente, se puede concluir que cada uno de los objetivos trazados en la investigación se cumplieron a cabalidad, abarcando y respondiendo a las exigencias que se plantearon inicialmente para que el sistema de tratamiento terciario de aguas residuales municipales fuese exitoso.

10. Recomendaciones

Considerando que en la presente investigación se mantiene un enfoque en la construcción del sistema de tratamiento, teniendo en cuenta unos parámetros de diseño establecidos, para evaluar su funcionamiento y eficiencia mediante la puesta en marcha del mismo, analizando estadísticamente el comportamiento de los parámetros monitoreados, es importante trazar una serie de pautas que sean estudiadas en las siguientes investigaciones realizadas en este campo. Este proyecto ofrece una nueva tecnología para el tratamiento de aguas residuales, con una especial importancia en la eliminación de nutrientes debido a los efectos negativos que ocasionan sobre los cuerpos de agua residuales, por lo anterior se recomienda lo siguiente:

- Ampliar el periodo de tiempo durante la puesta en marcha del sistema de tratamiento, reactor tipo Batch, logrando obtener una mayor cantidad de datos que permitan definir el periodo en el que se alcanza una estabilización.
- Aumentar la cantidad de reactores que conforman el sistema con el fin de conocer su capacidad en el tratamiento de un mayor volumen de agua residual y establecer si se logra una mejor eficiencia en la remoción de la concentración de los contaminantes, al incorporar una cantidad más amplia de material bioadsorbente.
- Estudiar la posibilidad de utilizar otro tipo de metodología de tratamiento y análisis, con el propósito de evaluar más afondo el comportamiento del sistema construido.
- Realizar de manera individual y exhaustiva la evaluación de las microalgas y el material bioadsorbente dentro del reactor, buscando otros métodos de implementación que aumenten el área de contacto con dichos medios y así conocer su incidencia durante el proceso de tratamiento.

11. Referencias

Agua, b. d. (2016). Eutrofización, problemática ambiental en la depuración de aguas residuales.

blog del agua.

Alcaraz, R. B. (2017). AGUAS DEPURADAS PARA RIEGO II. DBO. *TILOON*, 1.

Alcaraz, R. B. (2017). AGUAS DEPURADAS PARA RIEGO II. DBO. *TILOON*, 1.

Almeida, M., Betanzos, A., García, I., García, N., Montalvo, J. (2014). Modelación de la eutroficación e índice de calidad del agua en algunas bahías del archipiélago Sabana Camagüey. *Tecnología Química*, 34(3), 307-323. Recuperado de <http://scielo.sld.cu/pdf/rtq/v34n3/rtq09314.pdf>

Amaral, M. d. (2016). Tratamiento de aguas residuales con microalgas en reactores abiertos. *dialnet.*

Armenteros, T., Hernández, J. y Pérez, F. (2016). Sistema de tratamiento para las aguas residuales en la Empresa de Aprovechamiento Hidráulico Villa Clara. *Centro Azúcar*, 43(2), 68-75. Recuperado de <http://scielo.sld.cu/pdf/caz/v43n2/caz07216.pdf>

Bach. Heidy Stephany Victoria Díaz Pérez, B. J. (2015). “*Simulación de una planta de tratamiento de aguas residuales y su análisis Técnico - económico - ambiental en la ciudad de Iquitos mediante el uso de Super pro Designer V6 – 2015*”. Iquitos - Peru.

Bahía Blanca Plata 3era Cuenca. Recuperado de http://www.edutecne.utn.edu.ar/agua/agua_reutilizacion.pdf

BASF. (2017). *Plantas de tratamiento de aguas residuales. Soluciones de reparación, protección e impermeabilización*. Recuperado de <https://assets.master-builders->

solutions.basf.com/es-

es/mbs_broschuere_planta_de_tratamiento_de_aguas_residuales.pdf

Bernal, J. A., Carrasquero, S. J., Díaz, A. R. y Rodríguez, M. G. (2018). Evaluación de la eficiencia de un reactor biológico secuencial en el tratamiento de efluentes de una planta procesadora de productos cárnicos. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 14(1), 23-33.

doi: 10.18359/rfcb.3017

Blazquez, P. y Montero, C.. (2010). Reutilización de agua en

Briceño, Y. y Torres, J. (2016). *Tratamiento de aguas residuales de tipo doméstico a partir de coleópteros Scarabaeidae* (tesis de pregrado). Universidad Nacional Abierta y a

Distancia, Garagoa, Boyacá. Recuperado de

<https://repository.unad.edu.co/handle/10596/6254>

Carmen Cárdenas, S. C. (2012). Desempeño de un reactor biológico secuencial (RBS). *revista colombiana de biotecnología*, 111- 120 .

carrasquero ferrer sedolfo, b. v. (2017). eficiencia de un reactor biologico secuencial para el tratamiento de efluentes de una planta procesadora de productos carnicos. *facultad de ciencias basicas*.

Carrasquero, S. J., Díaz, A. R., Pire, M. C. y Rincón, N. C. (2014). Monitoreo de la remoción biológica de nitrógeno en efluentes de tenerías usando un reactor por carga secuencial.

Ingeniería, Investigación y Tecnología, 15(2), 287-298. doi: 10.1016/S1405-

7743(14)72217-6

- Cedrón, O. Z. y Cribilleros, A. C. (2017). *Diagnóstico del sistema de aguas residuales en Salaverry y propuesta de solución* (tesis de pregrado). Universidad Privada Antenor Orrego, Trujillo, Perú. Recuperado de <http://repositorio.upao.edu.pe/handle/upaorep/3561>
- Cheng, S., Fu, L., Hu, T., Lin, G., Peng, J., Srinivasakannan, C., ..., Zhang, L., (2018). Selective recovery of Au(III) from aqueous solutions using 2-aminothiazole functionalized corn bract as low-cost bioadsorbent. *Journal of Cleaner Production*, 196, 1007-1015. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.06.168
- Comisión Nacional de los Derechos Humanos (CNDH) y Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). (2018). *Estudio sobre la protección de ríos, lagos y acuíferos desde la perspectiva de los derechos humanos*. Recuperado de http://www.cndh.org.mx/sites/all/doc/Informes/Especiales/ESTUDIO_RIOS_LAGOS_A_CUIFEROS.pdf
- Cortez, C. (2012). Tratamiento de agua residual urbana con salinidad viable. Granada: Facultad de Farmacia.
- Cortez, C. (2012). *Tratamiento de agua residual urbana con salinidad viable*. Granada: Facultad de Farmacia.
- Council, W. W. (2016). CLIMATE AND WATER. Recuperado de http://www.worldwatercouncil.org/fileadmin/world_water_council/documents/official_documents/Climate_is_water_FLYER.pdf: A PERMANENT INTERCONNECTION
- Council, W. W. (2016). *CLIMATE AND WATER*. Sitio web: http://www.worldwatercouncil.org/fileadmin/world_water_council/documents/official_documents/Climate_is_water_FLYER.pdf: A PERMANENT INTERCONNECTION. .

Crites, R. &. (2010). *Sistema de manejo de aguas residuales para*. Bogota.

Cyclus. (2018). Tipologías Aguas Residuales. Recuperado de
<http://www.cyclusid.com/tecnologias-aguas-residuales/tipologias/>

Cyclus. (23 de 08 de 2018). <http://www.cyclusid.com>. Obtenido de
<http://www.cyclusid.com/tecnologias-aguas-residuales/tipologias/>

Dagnino, J. (2014). Análisis de varianza. *Revista Chilena de Anestesia*, 43, 306-310. Recuperado de <http://revistachilenadeanestesia.cl/PII/revchilanestv43n04.07.pdf>

E.S.P, T. A. (2019). *Estación Depuradora De Aguas Residuales (EDAR)*. BARRANQUILLA.

Fernandez, S. d. (2016). *Unioversidad Autonoma de Madrid*. Recuperado el 06 de 06 de 2019, de
<http://www.estadistica.net/ECONOMETRIA/ANALISIS-VARIANZA/analisis-varianza.pdf>

Flez, M. (2009). *Situación actual del estado de la depuración biológica. Explicación de los métodos y sus fundamentos*. Barcelona.

Galeano, L. J. y Rojas, V. D. (2016). *Propuesta de diseño de una planta de tratamiento de agua residual por zanjón de oxidación para el casco urbano del municipio de Vélez - Santander* (tesis de pregrado). Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia. Recuperado de <http://repository.ucatolica.edu.co:8080/handle/10983/13930>

García, Z. M. (2012). Comparación y evaluación de tres plantas acuáticas para determinar la eficiencia de remoción de nutrientes en el tratamiento de aguas residuales domésticas (tesis de pregrado). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima Perú. Recuperado de <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/1292>

- Gómez, A. y Henao, Á. (2018). De la complejidad jurídica de los vertimientos. *Revista Prolegómenos Derechos y Valores*, 21(41), 25-41. doi: 10.18359/prole.3328
- González, C., Larios, J. y Morales, Y. (2015). Las aguas residuales y sus consecuencias en el Perú. *Saber y Hacer*, 2(2), 09-25. Recuperado de <http://revistas.usil.edu.pe/index.php/syh/article/view/115/215>
- González, J. A. (2009). *Manual básico SPSS. Manual de introducción a SPSS*. Recuperado de https://www.fibao.es/media/uploads/manual_basico_spss_universidad_de_talca.pdf
- GRUPO. (12 de 2019). *Desarrollo de vidrios para el cultivo de microalgas en fotobiorreactores abiertos y cerrados*. Obtenido de <https://www.grupocooperativocajamar.es/recursos-entidades/pdf/bd/agroalimentario/innovacion/investigacion/bioeconomia/ficha-microalgas-1558510938.pdf>
- Gutierrez, J. -M. (2013). *Sistemas de aguas residuales*. Bogota: Universidad Nacional .
- Hamid, M. y Ramli, N. (2017). A review on two different systems in municipal sewage treatment plant. En 2017 IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON) (pp. 207-211). Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE. Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/document/8262485>
- Hernandez, A., & Garzon, E. (2014). Microalgae, culture and benefits. *biologia marina y oceanografica*, 157-173.
- Holistic, I. (08 de 08 de 2015). Why is water important for life . Obtenido de <http://www.ivyroses.com/Biology/Why-is-water-important-to-life.php>
- Holistic, I. (08 de 08 de 2015). *Why is water important for life* . Obtenido de <http://www.ivyroses.com/Biology/Why-is-water-important-to-life.php>

<http://repositorio.educacionsuperior.gob.ec/handle/28000/2150>

Ibérica, S. (11 de 4 de 2018). *eutrofizacion: causas, consecuencia y soluciones*. Obtenido de

<https://www.iagua.es/sewervac-iberica>

IBORRA, M., TEJERO, J., & FIDEL, C. (2013). *REACTORES MULTIFACICOS*.

BARCELONA .

in-Jie, M., Guan-Wen, C., Zi-Han, X., Min, W., Bin, L., Li-Li, L., & Bo, L. (2013). Analysis on Construction and Operation Effectiveness of County Sewage Treatment Plant in Guangxi.

Izquierdo, E., Menéndez, C. y Quiroz, L. (2018). Estudio del impacto ambiental del vertimiento de aguas residuales sobre la capacidad de autodepuración del Río Portoviejo, Ecuador.

Centro Azúcar, 45(1), 73-83. Recuperado de

<http://scielo.sld.cu/pdf/caz/v45n1/caz08118.pdf>

J. R, B., Montañez, J. C., C. N, A., A, M.-Z., & B, V. (2012). *tecnologia de cultivo de microalgas en fotobiorreactores*.

Jahn, L., Krampe, J. y Svardal, K. (2019). Comparison of aerobic granulation in SBR and continuous-flow plants. *Journal of Environmental Management*, 231, 953-961. doi: 10.1016/j.jenvman.2018.10.101

Jin-Jie, M., Guan-Wen, C., Zi-Han, X., Min, W., Bin, L., Li-Li, L., & Bo, L. (2013). Analysis on Construction and Operation Effectiveness of County Sewage Treatment Plant in Guangxi.

Johnny Torres Medina, Y. B. (2016). Aguas residuales de tipo doméstico a partir de coleópteros scarabaeidae. Garagoa - Boyaca: UNAD.

- Johnny Torres Medina, Y. B. (2016). *Aguas residuales de tipo doméstico a partir de coleópteros scarabaeidae*. Garagoa - Boyaca: UNAD.
- LEVENSPIEL, O. (2004). *Ingeniería de las reacciones químicas*. MEXICO : REPLA S.A .
- Litoral, E. s. (2018). En E. s. Litoral. cuenca.
- Litoral, Escuela superior politecnica del. (2018). En E. s. litoral. cuenca.
- Loayza, J. E. (2009). La problemática del agua y el tratamiento de aguas residuales. *virtualpro*, 4.
- López, M. E. (2013). *Aguas residuales Composición* .
- López, M. E. (2013). *Aguas residuales Composición*.
- Lopez, M. Y. (2013). *Aguas Residuales*. Barranquilla - Atlantico.
- Lozada, P. T. (2012). Perspectivas del tratamiento anaerobio de aguas residuales domésticas en países en desarrollo. *dialnet*.
- Macloni, D. (2014). *Diseño de planta de tratamiento de aguas residuales para el municipio de san Juan Chamelco, Alta Verapaz*. Guatemala de la Asuncion.
- Maria Rodriguez, A. J. (2013). Humedal de flujo vertical para tratamiento terciario del efluente físico-químico de una estación depuradora de aguas residuales domésticas. *Ingeniería Investigación y Tecnología*.
- Milagros Garcia, O. R. (2012). Comparación y evaluación de tres plantas acuáticas para determinar la eficiencia de remoción de nutrientes en el tratamiento de aguas residuales domésticas. *Universidad Nacional de Ingeniería*.
- MinAmbiente, M. d. (17 de 03 de 2015). *atcalsas*. Obtenido de <http://www.atcalsas.com/uploads/1426818014.pdf>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). (17 de marzo de 2015). Resolución

No. 0631 de 2015. Recuperado de

<http://www.aguasdebuga.net/intranet/sites/default/files/Resoluci%C3%B3n%200631%20de%202015-Calidad%20vertimientos.pdf>

ministerio de medio ambiente y desarrollo sostenible. (2015). resolucion 631.

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2000). Ley general sobre medio ambiente

y recursos naturales (Ley 64-00). Recuperado de <https://plataformacelac.org/ley/189>

Montero, P. B.-M. (2010). *Reutilizacion de agua en bahia blanca plata 3era cuenca*. Buenos

Aires : Universidad Tecnologica Nacional .

Mopoung, S. N. (2014). Sintered filter materials with controlled porosity for water purification

prepared from mixtures with optimal ratio of zeolite, bentonite, kaolinite, and charcoal.

Applied Clay, 88-89, 123-128.

Morales, M. (2016). *Tratamiento de aguas residuales con microalgas en reactores abiertos*

(tesis doctoral). Universidad de Almería, Almería, España. Recuperado de

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/dctes?codigo=111493>

Navarro, A. F. y Palladino, L. A. (2009). Degradación de Efluentes Líquidos Mediante Lechos

Fluidizados. *Información tecnológica*, 20(5), 13-18. doi: 10.1612/inf.tecnol.4094it.08

Núñez, A. L. (2015). *Caracterización de la problemática de las aguas residuales en Ixmiquilpan*

Hidalgo (tesis de pregrado). Universidad Autónoma Metropolitana, Pachuca, México.

Recuperado de [http://dcsh.izt.uam.mx/licenciaturas/geografia_humana/wp-](http://dcsh.izt.uam.mx/licenciaturas/geografia_humana/wp-content/uploads/2015/09/Tesina-Ana-Laura-Nu%C3%B1ez-2015.pdf)

[content/uploads/2015/09/Tesina-Ana-Laura-Nu%C3%B1ez-2015.pdf](http://dcsh.izt.uam.mx/licenciaturas/geografia_humana/wp-content/uploads/2015/09/Tesina-Ana-Laura-Nu%C3%B1ez-2015.pdf)

OG, G. (s.f.). *Grupo OG Diseño y Producción de Ideas*. Obtenido de

www.ogacrilicos.com/post/8-ventajas-del-acrílico

ONU. (2017). *2100 millones de personas carecen de agua potable en el hogar y más del doble no disponen de saneamiento seguro*. ginebra.

Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO).

(2017). *Informe mundial de las naciones unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2017. Aguas residuales: El recurso desaprovechado*. Recuperado de <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000247647>

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2018). *Agua limpia y saneamiento. Progresos en el tratamiento de las aguas residuales*. Recuperado de

<https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/275972/9789243514895-spa.pdf?ua=1>

Organización Mundial de la Salud, U. W. (2018). *Progresos en el tratamiento de las aguas residuales*. Washington, D.C.

Palladino, A. F. (2009). *Degradación de Efluentes Líquidos Mediante Lechos Fluidizados. la serena*.

Pedret, C., Santín, I. y Vilanova, R. (2017). Control y operación de estaciones depuradoras de aguas residuales: modelado y simulación. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 14(3), 217-233. doi: 10.1016/j.riai.2017.05.004

Pineda, L. L. (2017). *Diagnóstico de la planta de tratamiento de agua residual (PTAR) de Tunja - Boyacá* (tesis de pregrado). Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia. Recuperado de

<https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/14554/1/Diagnostico%20de%20la%20>

0planta% 20de% 20tratamiento% 20de% 20agua% 20PTAR% 20residual% 20de% 20Tunja%
20-% 20Boyac%C3%A1.pdf

Ramli, N. A., & Hamid, M. F. (17 de 03 de 2017). A review on two different systems in municipal sewage treatment plant. *Conference on Energy Conversion (CENCON)*.
Obtenido de <http://www.atcalsas.com/uploads/1426818014.pdf>

Ramon Vilanova, I. S. (2014). Control y Operacion de Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales: Modelado y Simulacion. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*.

Ramos, A. (2018). Evaluación del riesgo de eutrofización del embalse El Quimbo, Huila (Colombia). *Revista Logos Ciencia & Tecnología*, 10(2), 172-192. doi: 10.22335/rlct.v10i2.461

Rodriguez, H. (13 de 3 de 2017). *aguas residuales y sus efectos contaminantes* . Obtenido de <https://www.iagua.es/blogs/hector-rodriguez-pimentel/aguas-residuales-y-efectos-contaminantes>

Romero, J. (2002). *Tratamiento de aguas residuales teoria y principios de diseño*. Bogota.

Salazar, D. B.-F. (2013). *Optimización de la planta de tratamiento de aguas residuales industriales de una empresa textil*. Guayaquil: UPS.

Salud, O. P. (2005). *GUÍA PARA DISEÑO DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE FILTRACIÓN EN MÚLTIPLES ETAPAS*. Lima .

Santos, a. m., Gonzales, Y., & Martin, C. (2014). *Uso y aplicaciones potenciales de las microalgas*. anales de mecánica y electricidad.

SINIP. (2012). Construcción sistema de tratamiento aguas residuales avenida la . Santa Cruz Verapaz: parroquia, área urbana, Santa Cruz Verapaz, Alta Verapaz.

- SINIP. (2012). *Construcción sistema de tratamiento aguas residuales avenida la . Santa Cruz*
Verapaz: parroquia, área urbana, Santa Cruz Verapaz, Alta Verapaz.
- Sperling, M. V. (2014). *Lodos Activados, principios del tratamiento biologico de aguas residuales*. San Juan de Pasto: Universidad de Nariño.
- Talca, U. d. (2010). Manual Basico SPSS. En J. A. Gonzales, *Manual Basico SPSS* (pág. 70).
Talca.
- Torres, G. F. (2014). *Tratamiento de aguas residuales mediante la combinación de técnicas avanzadas de oxidación y biofiltros* (tesis doctoral). Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Las Palmas de Gran Canaria, España. Recuperado de
- Torres, P. (2012). Perspectivas del tratamiento anaerobio de aguas residuales domésticas en países en desarrollo. Revista EIA, (18), 115-129. Recuperado de
<http://www.scielo.org.co/pdf/eia/n18/n18a10.pdf>
- Triplenlace. (2012). Eutrofización: causas y efectos. *Triplenlace*.
- TRIPLLENLACE. (2012). EUTROFIZACIÓN: CAUSAS Y EFECTOS. *TRIPLLENLACE*.
- UDEP. (2016). Naturaleza del agua domestica. En UDEP. Lima-Peru.
- UDEP. (2016). Naturaleza del agua domestica. En UDEP. Lima-Peru.
- UNESCO. (2017). *AGUAS RESIDUALES EL RECURSO DESAPROVECHADO*. PARIS : UN
WATER .
- Velásquez, S., & y Ulate, A. (2012). *DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE UN FOTOBIORREACTOR TUBULAR PARA PRODUCIR LA MICROALGA CHLORELLA SP*. san jose .

Anexos

En la presente sección se relacionan los anexos mencionados en el documento.

Tabla 19.

Datos de las concentraciones obtenidas durante las pruebas realizadas en la evaluación preliminar del sistema

Parámetros	Tiempo (h)											
	19/01/2018				10/04/2018				08/06/2018			
	0	2	4	6	0	2	4	6	0	2	4	6
Alcalinidad (mg/L)	260,00	320,00	280,00	293,00	300,00	348,00	332,00	328,00	352,00	320,00	324,00	316,00
Conductividad (μS)	0,992	0,929	1,051	1,109	0,99	1,19	1,13	1,10	1,25	1,19	1,17	1,17
DBO ₅ (mg/L)	73,27	51,45	49,45	47,8	57,83	32,06	34,24	31,03	47,80	39,54	37,23	38,10
DQO (mg/L)	154,00	135,00	132,00	134,00	85,57	67,12	64,05	66,23	190,30	120,40	123,80	119,00
PO ₄ (mg/L)	41,20	28,70	24,80	24,30	53,60	34,20	32,60	30,10	39,5	32,7	32,00	29,70
NO ₃ (mg/L)	0,25	0,23	0,21	0,18	0,71	0,58	0,51	0,55	0,35	0,29	0,21	0,25
NO ₂ (mg/L)	0,39	0,29	0,25	0,23	0,25	0,18	0,11	0,12	0,28	0,15	0,20	0,17
OD (%)	20,10	28,30	37,10	24,40	21,00	33,50	34,70	35,00	0,20	2,46	2,07	2,45
SDT (g/L)	0,62	0,60	0,59	0,72	0,61	0,71	0,69	0,64	--	--	--	--
pH	7,29	8,54	8,65	8,98	5,40	4,20	7,50	6,40	6,11	6,17	6,97	6,97
T (°C)	26,90	31,30	26,10	30,70	27,40	24,90	24,90	24,80	27,50	30,10	29,20	31,80

Nota: Se realizó la medición de los parámetros durante tres (3) días y con una frecuencia de cada 2 horas.

Tabla 20

Datos de las concentraciones obtenidas durante las pruebas realizadas en la evaluación del sistema de tratamiento simple (STS)

Parámetros	Tiempo (h)						
	0	2	4	Combinada*	6	8	Combinada*
Alcalinidad (mg/L)	384,00	380,00	340,00	368,00	360,00	408,00	400,00
Conductividad (μ S)	1242,00	1232,00	995,00	1188,00	1193,00	1173,00	1218,00
DBO ₅ (mg/L)	49,70	47,40	35,10	37,65	42,45	14,10	46,95
DQO (mg/L)	147,70	97,87	82,50	110,20	54,83	24,08	131,26
PO ₄ (mg/L)	66,60	39,10	69,40	67,30	60,00	58,80	68,40
NO ₃ (mg/L)	3,78	2,63	1,81	2,86	2,40	1,11	1,86
NO ₂ (mg/L)	0,32	0,54	0,40	0,67	0,64	0,63	1,46
OD (%)	0,60	3,07	2,84	1,91	3,11	2,71	2,14
SDT (g/L)	795,00	727,00	604,00	731,00	710,00	670,00	737,00
pH	6,96	7,82	7,64	6,90	7,23	7,82	7,15
T (°C)	25,30	31,20	26,80	27,90	24,90	32,20	24,90

Nota: *En este periodo se depositó una cantidad de agua residual que se mezclaría con el volumen del sistema para evaluar la capacidad de remoción del mismo.

Tabla 21

Datos de las concentraciones obtenidas durante las pruebas realizadas en la evaluación del sistema de tratamiento con filtración múltiple (SFM)

Parámetros	Tiempo (h)
------------	------------

	0	4	8	12	16	20	24
Alcalinidad (mg/L)	272,00	272,00	252,00	236,00	248,00	224,00	212,00
Concentración celular (Cel/mL)	4.7x10 ⁶	4.8x10 ⁶	5x10 ⁶	5.3x10 ⁶	5.5x10 ⁶	5.5x10 ⁶	5.6x10 ⁶
Conductividad (μS)	965,00	955,00	945,00	940,00	800,00	1320,00	1330,00
DBO ₅ (mg/L)	90,00	80,00	70,90	65,00	10,00	60,00	157,00
DQO (mg/L)	156,33	142,67	124,00	182,00	169,33	151,00	163,33
PO ₄ (mg/L)	7,40	8,20	6,70	3,50	0,80	3,00	8,50
NO ₃ (mg/L)	4,00	3,50	2,00	2,00	1,00	<<	6,00
NO ₂ (mg/L)	7,40	8,20	6,70	3,50	0,80	3,00	8,50
OD (%)	1,88	2,54	2,24	2,26	2,03	3,47	3,68
Turbiedad (UNT)	223,00	192,00	170,00	153,00	132,00	148,00	138,00
pH	6,73	7,78	7,90	8,19	8,49	8,27	8,80
T (°C)	23,70	27,70	27,50	30,70	31,80	31,00	30,00

Nota: Se realizó la medición de los parámetros durante dos (2) días y con una frecuencia de cada 4 horas, considerando el tiempo de residencia de las microalgas.

Tabla 22.

Tabla de comparaciones múltiples sobre el análisis de varianza del sistema de tratamiento simple (STS)

Variable dependiente	(I) Parámetro	(J) Parámetro	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	95% de intervalo de confianza		
Entrada del sistema	HSD	DBO ₅				Límite inferior	Límite superior	
			DQO	-84,95333*	7,45662	,000	-109,4937	-60,4130
	Tukey			NO ₂	44,15000*	7,45662	,001	19,6097

DQO	NO ₃	41,75333*	7,45662	,002	17,2130	66,2937
	PO ₄	-20,56667	7,45662	,113	-45,1070	3,9737
	DBO ₅	84,95333*	7,45662	,000	60,4130	109,4937
	NO ₂	129,10333*	7,45662	,000	104,5630	153,6437
	NO ₃	126,70667*	7,45662	,000	102,1663	151,2470
	PO ₄	64,38667*	7,45662	,000	39,8463	88,9270
NO ₂	DBO ₅	-44,15000*	7,45662	,001	-68,6903	-19,6097
	DQO	-	7,45662	,000	-153,6437	-104,5630
	NO ₃	-2,39667	7,45662	,997	-26,9370	22,1437
	PO ₄	-64,71667*	7,45662	,000	-89,2570	-40,1763
	DBO ₅	-41,75333*	7,45662	,002	-66,2937	-17,2130
NO ₃	DQO	-	7,45662	,000	-151,2470	-102,1663
	NO ₂	2,39667	7,45662	,997	-22,1437	26,9370
	PO ₄	-62,32000*	7,45662	,000	-86,8603	-37,7797
	DBO ₅	20,56667	7,45662	,113	-3,9737	45,1070
PO ₄	DQO	-64,38667*	7,45662	,000	-88,9270	-39,8463
	NO ₂	64,71667*	7,45662	,000	40,1763	89,2570
	NO ₃	62,32000*	7,45662	,000	37,7797	86,8603
	DBO ₅	-84,95333*	11,44868	,034	-156,6234	-13,2833

Games- Howell	DQO	NO ₂	44,15000*	3,64602	,021	16,1046	72,1954
		NO ₃	41,75333*	3,66831	,022	14,3007	69,2060
		PO ₄	-20,56667	4,58872	,055	-41,7135	,5801
		DBO ₅	84,95333*	11,44868	,034	13,2833	156,6234
		NO ₂	129,10333*	10,85274	,021	45,6037	212,6030
		NO ₃	126,70667*	10,86025	,022	43,4140	209,9993
		PO ₄	64,38667	11,20468	,070	-11,1545	139,9279
		DBO ₅	-44,15000*	3,64602	,021	-72,1954	-16,1046
	NO ₂	DQO	-	10,85274	,021	-212,6030	-45,6037
		NO ₃	129,10333*				
		NO ₃	-2,39667	,40758	,081	-5,4670	,6737
		PO ₄	-64,71667*	2,78675	,006	-86,1484	-43,2849
	NO ₃	DBO ₅	-41,75333*	3,66831	,022	-69,2060	-14,3007
		DQO	-	10,86025	,022	-209,9993	-43,4140
		NO ₂	126,70667*				
		NO ₂	2,39667	,40758	,081	-,6737	5,4670
		PO ₄	-62,32000*	2,81585	,005	-82,9994	-41,6406
	PO ₄	DBO ₅	20,56667	4,58872	,055	-,5801	41,7135
		DQO	-64,38667	11,20468	,070	-139,9279	11,1545
		NO ₂	64,71667*	2,78675	,006	43,2849	86,1484
		NO ₃	62,32000*	2,81585	,005	41,6406	82,9994

Salida del sistema	HSD Tukey	DBO ₅	DQO	-36,75000*	9,82438	,025	-69,0828	-4,4172
			NO ₂	41,20000*	9,82438	,012	8,8672	73,5328
			NO ₃	39,80000*	9,82438	,015	7,4672	72,1328
			PO ₄	-13,41667	9,82438	,661	-45,7495	18,9162
		DQO	DBO ₅	36,75000*	9,82438	,025	4,4172	69,0828
			NO ₂	77,95000*	9,82438	,000	45,6172	110,2828
			NO ₃	76,55000*	9,82438	,000	44,2172	108,8828
			PO ₄	NITRITO	9,82438	,199	-8,9995	55,6662
		NO ₂	DBO ₅	-41,20000*	9,82438	,012	-73,5328	-8,8672
			DQO	-77,95000*	9,82438	,000	-110,2828	-45,6172
			NO ₃	-1,40000	9,82438	1,000	-33,7328	30,9328
			PO ₄	-54,61667*	9,82438	,002	-86,9495	-22,2838
		NO ₃	DBO ₅	-39,80000*	9,82438	,015	-72,1328	-7,4672
			DQO	-76,55000*	9,82438	,000	-108,8828	-44,2172
			NO ₂	1,40000	9,82438	1,000	-30,9328	33,7328
			PO ₄	-53,21667*	9,82438	,002	-85,5495	-20,8838
		PO ₄	DBO ₅	13,41667	9,82438	,661	-18,9162	45,7495
			DQO	NITRITO	9,82438	,199	-55,6662	8,9995
			NO ₂	54,61667*	9,82438	,002	22,2838	86,9495
			NO ₃	53,21667*	9,82438	,002	20,8838	85,5495

Games- Howell	DBO ₅	DQO	-36,75000	13,08970	,273	-122,8546	49,3546
		NO ₂	41,20000*	3,57437	,023	13,7411	68,6589
		NO ₃	39,80000*	3,60006	,023	13,0171	66,5829
		PO ₄	-13,41667	9,08416	,637	-65,5157	38,6824
	DQO	DBO ₅	36,75000	13,08970	,273	-49,3546	122,8546
		NO ₂	77,95000	12,59291	,076	-18,9291	174,8291
		NO ₃	76,55000	12,60022	,078	-20,1273	173,2273
		PO ₄	NITRITO	15,11050	,596	-49,3906	96,0572
	NO ₂	DBO ₅	-41,20000*	3,57437	,023	-68,6589	-13,7411
		DQO	-77,95000	12,59291	,076	-174,8291	18,9291
		NO ₃	-1,40000	,44896	,238	-4,5456	1,7456
		PO ₄	-54,61667	8,35243	,068	-118,8629	9,6296
	NO ₃	DBO ₅	-39,80000*	3,60006	,023	-66,5829	-13,0171
		DQO	-76,55000	12,60022	,078	-173,2273	20,1273
		NO ₂	1,40000	,44896	,238	-1,7456	4,5456
		PO ₄	-53,21667	8,36345	,071	-117,1604	10,7271
	PO ₄	DBO ₅	13,41667	9,08416	,637	-38,6824	65,5157
		DQO	NITRITO	15,11050	,596	-96,0572	49,3906
		NO ₂	54,61667	8,35243	,068	-9,6296	118,8629
		NO ₃	53,21667	8,36345	,071	-10,7271	117,1604

Nota: Análisis de varianza realizado por medio del programa SPSS.

Tabla 23

Tabla de comparaciones múltiples sobre el análisis de varianza del sistema de tratamiento con filtración múltiple (SFM)

Variable dependiente	(I) Parámetro	(J) Parámetro	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	95% de intervalo de confianza		
						Límite inferior	Límite superior	
ENTRADA DEL SISTEMA	HSD Tukey	DBO ₅	DQO	-93,58667*	7,47389	,000	-118,1839	-68,9895
			NO ₂	69,63333*	7,47389	,000	45,0361	94,2305
			NO ₃	67,66667*	7,47389	,000	43,0695	92,2639
			PO ₄	63,93333*	7,47389	,000	39,3361	88,5305
		DQO	DBO ₅	93,58667*	7,47389	,000	68,9895	118,1839
			NO ₂	163,22000*	7,47389	,000	138,6228	187,8172
			NO ₃	161,25333*	7,47389	,000	136,6561	185,8505
			PO ₄	157,52000*	7,47389	,000	132,9228	182,1172
		NO ₂	DBO ₅	-69,63333*	7,47389	,000	-94,2305	-45,0361
			DQO	-163,22000*	7,47389	,000	-187,8172	-138,6228
			NO ₃	-1,96667	7,47389	,999	-26,5639	22,6305
			PO ₄	-5,70000	7,47389	,936	-30,2972	18,8972
		NO ₃	DBO ₅	-67,66667*	7,47389	,000	-92,2639	-43,0695
			DQO	-161,25333*	7,47389	,000	-185,8505	-136,6561
			NO ₂	1,96667	7,47389	,999	-22,6305	26,5639
			PO ₄	-3,73333	7,47389	,986	-28,3305	20,8639

Games- Howell	PO ₄	DBO ₅	-63,93333*	7,47389	,000	-88,5305	-39,3361
		DQO	-157,52000*	7,47389	,000	-182,1172	-132,9228
		NO ₂	5,70000	7,47389	,936	-18,8972	30,2972
		NO ₃	3,73333	7,47389	,986	-20,8639	28,3305
	DBO ₅	DQO	-93,58667*	11,64316	,007	-145,8339	-41,3395
		NO ₂	69,63333*	8,84314	,044	4,1586	135,1081
		NO ₃	67,66667*	8,90256	,045	3,5997	131,7336
		PO ₄	63,93333	8,78812	,055	-2,9598	130,8265
	DQO	DBO ₅	93,58667*	11,64316	,007	41,3395	145,8339
		NO ₂	163,22000*	7,74782	,006	106,5012	219,9388
		NO ₃	161,25333*	7,81557	,005	106,0656	216,4411
		PO ₄	157,52000*	7,68497	,007	99,2157	215,8243
	NO ₂	DBO ₅	-69,63333*	8,84314	,044	-135,1081	-4,1586
		DQO	-163,22000*	7,74782	,006	-219,9388	-106,5012
		NO ₃	-1,96667	1,92902	,836	-10,9097	6,9763
		PO ₄	-5,70000	1,30256	,082	-12,5853	1,1853
	NO ₃	DBO ₅	-67,66667*	8,90256	,045	-131,7336	-3,5997
		DQO	-161,25333*	7,81557	,005	-216,4411	-106,0656
		NO ₂	1,96667	1,92902	,836	-6,9763	10,9097
		PO ₄	-3,73333	1,65865	,373	-13,5898	6,1231

SALIDA DEL SISTEMA	HSD Tukey	PO ₄	DBO ₅	-63,93333	8,78812	,055	-130,8265	2,9598
			DQO	-157,52000*	7,68497	,007	-215,8243	-99,2157
			NO ₂	5,70000	1,30256	,082	-1,1853	12,5853
			NO ₃	3,73333	1,65865	,373	-6,1231	13,5898
		DBO ₅	DQO	-102,66667*	14,41773	,000	-150,1166	-55,2167
			NO ₂	49,50000*	14,41773	,040	2,0501	96,9499
			NO ₃	47,76667*	14,41773	,048	,3167	95,2166
			PO ₄	44,13333	14,41773	,071	-3,3166	91,5833
		DQO	DBO ₅	102,66667*	14,41773	,000	55,2167	150,1166
			NO ₂	152,16667*	14,41773	,000	104,7167	199,6166
			NO ₃	150,43333*	14,41773	,000	102,9834	197,8833
			PO ₄	146,80000*	14,41773	,000	99,3501	194,2499
		NO ₂	DBO ₅	-49,50000*	14,41773	,040	-96,9499	-2,0501
			DQO	-152,16667*	14,41773	,000	-199,6166	-104,7167
			NO ₃	-1,73333	14,41773	1,000	-49,1833	45,7166
			PO ₄	-5,36667	14,41773	,995	-52,8166	42,0833
		NO ₃	DBO ₅	-47,76667*	14,41773	,048	-95,2166	-,3167
			DQO	-150,43333*	14,41773	,000	-197,8833	-102,9834
			NO ₂	1,73333	14,41773	1,000	-45,7166	49,1833
			PO ₄	-3,63333	14,41773	,999	-51,0833	43,8166

ENTRADA DEL SISTEMA	Games- Howell	PO ₄	DBO ₅	-44,13333	14,41773	,071	-91,5833	3,3166
			DQO	-146,80000*	14,41773	,000	-194,2499	-99,3501
			NO ₂	5,36667	14,41773	,995	-42,0833	52,8166
			NO ₃	3,63333	14,41773	,999	-43,8166	51,0833
		DBO ₅	DQO	-102,66667	22,68888	,097	-240,1060	34,7727
			NO ₂	49,50000	21,29097	,392	-113,8776	212,8776
			NO ₃	47,76667	21,36464	,411	-113,6316	209,1650
			PO ₄	44,13333	21,29489	,455	-119,1369	207,4036
		DQO	DBO ₅	102,66667	22,68888	,097	-34,7727	240,1060
			NO ₂	152,16667*	7,90792	,008	92,4804	211,8529
	HSD Tukey	DBO ₅	DQO	-93,58667*	7,47389	,000	-118,1839	-68,9895
			NO ₂	69,63333*	7,47389	,000	45,0361	94,2305
			NO ₃	67,66667*	7,47389	,000	43,0695	92,2639
			PO ₄	63,93333*	7,47389	,000	39,3361	88,5305
			NO ₃	150,43333*	8,10416	,006	95,1429	205,7237
			PO ₄	146,80000*	7,91845	,008	87,3872	206,2128
		NO ₂	DBO ₅	-49,50000	21,29097	,392	-212,8776	113,8776
			DQO	-152,16667*	7,90792	,008	-211,8529	-92,4804
			NO ₃	-1,73333	2,04885	,899	-14,0357	10,5690
			PO ₄	-5,36667*	1,10554	,039	-10,3293	-,4041

NO ₃	DBO ₅	-47,76667	21,36464	,411	-209,1650	113,6316
	DQO	-150,43333*	8,10416	,006	-205,7237	-95,1429
	NO ₂	1,73333	2,04885	,899	-10,5690	14,0357
	PO ₄	-3,63333	2,08913	,531	-15,5359	8,2692
PO ₄	DBO ₅	-44,13333	21,29489	,455	-207,4036	119,1369
	DQO	-146,80000*	7,91845	,008	-206,2128	-87,3872
	NO ₂	5,36667*	1,10554	,039	,4041	10,3293
	NO ₃	3,63333	2,08913	,531	-8,2692	15,5359

Nota: Análisis de varianza realizado por medio del programa SPSS.